

Untersuchungen zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

Genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Jens Mammitzsch
geboren am 17.05.1980 in Karl-Marx-Stadt
eingereicht am 29.09.2014

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Nendel

Prof. Dr. rer. nat. Hardy Müller

Chemnitz, den 16.01.2015

Bibliographische Angaben

Mammitzsch, Jens

Thema:

Untersuchungen zum Einsatz von ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in Seilen für die Fördertechnik

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Chemnitz 2014

101 Seiten; 50 Abbildungen; 28 Tabellen; 72 Literaturstellen

Kurzreferat

Seile aus synthetischen Fasern gewinnen zunehmend an Bedeutung für fördertechnische Anwendungen. Wegen ihrer geringen Dichte und Biegesteifigkeit sowie den gleichzeitig mit Stahl vergleichbaren Zugfestigkeiten, haben sich Seile aus ultrahochmolekularen Polyethylenfasern (UHMW-PE) in vielen Anwendungen in der Seefahrt und im Offshore-Bereich durchgesetzt. Die grundsätzliche Eignung solcher Seile für technische Anwendungen, wie z.B. Kräne, Aufzüge, Windenanwendungen, wurde in wissenschaftlichen Studien bereits nachgewiesen.

In der vorliegenden Arbeit werden hochfeste Polyethylenfasern verschiedener Hersteller daraufhin untersucht, in wie weit diese durch ihre Eigenschaftsprofile ebenfalls grundsätzlich für technische Anwendungen mit auftretenden Biegewechselbelastungen geeignet sind und welche Anwendungspotentiale sie bieten. Beginnend mit einem kurzen geschichtlichen Abriss über die Entwicklung von synthetischen Polymerfasern und den Einsatz der Fasern in Seilen für technische Anwendungen, sollen grundlegend die Herstellungsverfahren und Eigenschaften von Garnen aus ausgewählten UHMW Polyethylen verglichen werden. Im weiteren Verlauf werden Faserseile aus den gewählten Fasern hinsichtlich Zugfestigkeit, Biegewechselverhalten und Eignung zum Thermofixieren untersucht. Auftretende Effekte werden analysiert und auf die Eigenschaften der Fasern bzw. Garne zurückgeführt. Eine vergleichende Betrachtung der Materialkosten als Teil der gesamten Herstellungskosten der Seile bildet den Abschluss der Arbeit.

Schlagworte: Faserseil, hochfestes Polyethylen, ultrahochmolekulares Polyethylen, Polyethylenfasern, UHMW Polyethylen, HMPE

Abstract

This thesis covers investigations on the properties of ultrahigh-molecular-weight (UHMW) polyethylene fibers for use of manufacturing braided fiber ropes for conveyor and hoisting applications.

The importance of synthetic fibres for conveying applications has increased during the last years. Due to the low density and bending stiffness at a strength that is comparable to steel, ropes made from high-strength UHMW polyethylene fibres have found their ways into several shipping and off-shore applications. The basic aptitude of UHMW polyethylene fibres to be used in applications like cranes, elevators and winch applications has already been proven in scientific works.

Within this thesis, selected UHMW polyethylene fibres are investigated to determine how much their differing property profiles do influence their aptitude to be used in technical applications with cyclic bending loads and for which potentials for fields of application they might be appropriate. Starting with a short overview on the history of synthetic fibres and the use of such fibres in technical applications, manufacturing processes and properties of these fibres are to be compared. Further, fibre ropes, made from the selected fibres, are going to be investigated concerning their tensile strength, behaviour in cyclic bend-over-sheave tests and their aptitude to increase the strength by thermosetting. Occurring effects are going to be analysed and related to the properties of the yarns. A competitive view on the prices of the yarns regarding their portion of the total costs of rope manufacturing is finalising this work.

Vorwort

Diese Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fördertechnik und Kunststoffe an der Technischen Universität Chemnitz, unter thematischer Anregung durch das Bundes-Exzellenzcluster „Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen – MERGE“, welches von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Großer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Nendel, dem Leiter der Professur Fördertechnik an der TU Chemnitz, für seine Bereitschaft, diese Arbeit zu betreuen, sowie für seine Anregungen zur Dissertationsschrift.

Herrn Professor Dr. rer. nat. Hardy Müller von der Westsächsischen Hochschule Zwickau danke ich für die Bereitschaft zur Übernahme der Zweitbegutachtung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Michael, Leiter der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente und mein direkter Fachvorgesetzter, danke ich für seine uneingeschränkte Unterstützung während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut, und für seine Ermutigung zur Anfertigung der Arbeit.

Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kretschmer und Herrn Matthias Tröltzsch gilt besonderer Dank für die schnelle und professionelle Planung, Umsetzung und Inbetriebnahme des verwendeten Biegeprüfstandes, der eine Bearbeitung des Themas erst ermöglicht hat.

Herrn Dr.-Ing. Thorsten Heinze danke ich für die fachlichen Diskussionen zur Prüfung von Faserseilen und textilen Maschinenelementen.

Den Mitarbeitern im Prüflabor danke ich für die große terminliche Flexibilität und die personelle Unterstützung bei der Durchführung der Versuche.

Herrn Dr.-Ing. Colin Kern und Herrn Peter Streubel M.Sc. möchte ich hiermit für das jederzeit interessierte Hinterfragen meiner Arbeit danken.

Herrn Dipl.-Ing. Reiner Brendel danke ich für die stets termingerechte Bereitstellung von insgesamt mehr als 1300 Metern Seil.

Dank schulde ich auch meiner Familie, deren Geduld und bestärkende Worte immer ein Antrieb waren.

Jens Mammitzsch

Kurzzeichenverzeichnis

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
DSC	Differential Scanning Calorimetry; deutsch: dynamische Differenzkalorimetrie
engl.	englisch
GPC	Gel-Permeations-Chromatographie
HM-HT	high-modulus high-tenacity; deutsch: hochmodulig hochfest
HMPE	high-modulus polyethylene; deutsch: hochmoduliges Polyethylen
Kap.	Kapitel
PDI	Polydispersitätsindex
S.	Seite
Tab.	Tabelle
UHMW	ultra-high molecular weight; deutsch: ultrahochmolekular
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel

Lateinische Formelzeichen und Symbole

A	mm ²	Fläche
A _{Eg}	mm ²	Ersatzquerschnitt eines Garnes
A _{EL}	mm ²	Ersatzquerschnitt einer Litze
c _i	g/l	Gewichtsanteil der i-ten Fraktion
c _L	g/l	Polymerkonzentration in einer Polymerlösung
D/d		Verhältnis zwischen Scheibendurchmesser und Seildurchmesser
ΔH _f	J/g	Schmelzenthalpie
ΔH _{f100%}	J/g	Schmelzenthalpie eines Polyethylenekristalles
d _N	mm	Nenndurchmesser eines Faserseiles
E	N/mm ²	E-Modul
E _c	N/mm ²	E-Modul eines Polymer-Einkristalles
E _{FE}	N/mm ²	E-Modul von Eisen
E _{PE}	N/mm ²	E-Modul von Polyethylenfasern

F_B	N	Bruchkraft von Faserseilen
$\overline{F_B}$	N	Mittlere Bruchkraft von Faserseilen
F_T	N	Nennkraft nach DIN EN ISO 2307
f_{Zwirn}		Zwirnfaktor
K_G	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm
K_{G12mm}	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 12$ mm
K_{GSK75}	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Dyneema® SK75
K_{GS1000}	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Spectra® S1000
K_{GTNX}	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus TNX®
K_{GFT093}	%	Normierte, relative Gesamtkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Eosten® FT093
K_M	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm
K_{M12mm}	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm
K_{MSK75}	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Dyneema® SK75
K_{MS1000}	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Spectra® S1000
K_{MTNX}	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus TNX®
K_{MFT093}	%	Normierte, relative Materialkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm aus Eosten® FT093
K_{ME}	%	Normierte, relative Maschinenkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm
K_{ME12mm}	%	Normierte, relative Maschinenkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm
K_P	%	Normierte, relative Personalkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 6$ mm

K_{P12mm}	%	Normierte, relative Personalkosten der Fertigung von Seilen $\varnothing 12$ mm
l	mm	Länge
l_0	mm	Freie Mindestprüflänge beim Zugversuch nach DIN EN ISO 2307
l_1	mm	Probenlänge zur Bestimmung der Seilfeinheit nach DIN EN ISO 2307
$l_{1/2}$	mm	Länge des Seilabschnittes mit einem halben Biegewechsel im Dauerbiegeversuch
l_{BZ}	mm	Länge der Biegezone im Dauerbiegeversuch
l_{Hub}	mm	Hublänge als Einstellwert an der Dauerbiegemaschine
l_p	mm	Schlaglänge bzw. Flechtlänge von Faserseilen
m	kg	Masse
\overline{M}_n	g/mol	Zahlenmittel der Molmasse
M	g/mol	Molmasse; auch molare Masse oder Molekulargewicht
\overline{M}_w	g/mol	Gewichtsmittel der Molmasse
N		Bruchbiegewechselzahl im Dauerbiegeversuch
N_G		Bruchbiegewechselzahl im Garnabrazionsversuch nach ASTM D 6611
n_{ref}		Nenngröße von Faserseilen nach DIN EN ISO 2307
PDI		Polydispersitätsindex
Q_1		oberes Quartil eines Boxplots
Q_2		Median der im Boxplot dargestellten Messwerte
Q_3		unteres Quartil eines Boxplots
R		Spannweite eines Boxplots
R_F		Reckgrad bei der Faserherstellung
R_G	mm	Gyrationsradius
R_{Garn}	N/mm ²	Zugfestigkeit eines Garnes

R_{Litze}	N/mm ²	Rechnerische Zugfestigkeit einer Litze
R_{theor}	N/mm ²	Theoretische Zugfestigkeit einer Faser
T	°C	Temperatur
T_t	dtex	Garntiter; auch Garnfeinheit
V	m ³	Volumen
V_L		Längenverhältnis
$v_{\text{prüf}}$	mm/min	Prüfgeschwindigkeit
$\text{Var}(F_B)$	%	Varianz der Bruchkraft im Garnzugversuch nach DIN EN ISO 2062
x_a		Maximalwert der im Boxplot dargestellten Messwerte einer Messreihe
x_1		Minimalwert der im Boxplot dargestellten Messwerte einer Messreihe

Griechische Formelzeichen und Symbole

α	%	Kristallinitätsgrad eines teilkristallinen Polymers
ϵ_{bFE}	%	Dehnung bei Bruch von Stahldraht
ϵ_{bPE}	%	Dehnung bei Bruch von UHMW Polyethylenfasern
ρ	g/cm ³	Dichte
ρ_1	g/m	Seilfeinheit nach DIN EN ISO 2307
σ_B	N/mm ²	Bruchspannung (eines Faserseiles)
$\overline{\sigma_B}$	N/mm ²	Mittelwert der Bruchspannung (eines Faserseiles)
σ_{BSK75}	N/mm ²	Bruchspannung eines Faserseiles aus der Faser Dyneema® SK75
σ_E	N/mm ²	Ersatzspannung (absoluter Wert)
σ_{Erel}	%	Relative Ersatzspannung
σ_z	N/mm ²	Zugspannung

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufstiegswinde mit Dyneema®-Seil (Ø 16 mm) auf einem Forwarder für Holzrückearbeiten am Steilhang	2
Abbildung 2: Aufzugsseil Schindler <i>Aramid</i> der Schindler Aufzüge AG (Schweiz)	5
Abbildung 3: Geschlagenes Stahlseil 8x19 Filler+SE 7x7 Ø7 mm (links) und geflochtenes Faserseil aus Dyneema SK75 Ø7 mm (rechts).....	6
Abbildung 4: Beziehung zwischen relativer Nutzlast, Fördertiefe und Sicherheitsfaktoren bei Draht- und Faserseilen (aus [MaH14]).....	7
Abbildung 5: Zwirne zur Litzenherstellung (in Anlehnung an [Ber11])	9
Abbildung 6: Schema zum Schlagen eines 3-litzigen Seiles	9
Abbildung 7: Im Trossenschlag geschlagenes, 3-litziges Seil aus Polypropylen	10
Abbildung 8: Schema zum Flechten von Seilen in einflechtiger Bindung	10
Abbildung 9: Rundgeflecht aus 12 gezwirnten Litzen	11
Abbildung 10: Doppelgeflecht mit 12-litzigem Kern und 16-litzigem Mantel	11
Abbildung 11: Kernmantelseil (gezwirnte Litzen im Kern; einflechtig geflochtener Mantel)	13
Abbildung 12: Schema einer Reckeinheit zum kontinuierlichen Thermofixieren von Faserseilen.....	15
Abbildung 13: Untersuchungsstand zu Stahldraht- und Faserseilen (nach [Mic12]).	18
Abbildung 14: Globulare Molekülstrukturen in Polymerlösungen (oben) und Molekülstruktur nach dem Verstrecken von Polymerfasern (unten); Quelle: [Bön86]	27
Abbildung 15: Seilmuster aus Spectra® S1000 in 2-flechtiger Bindung mit Verlauf eine Litze.....	33
Abbildung 16: Prüfmaschine Inspekt 10 mit Garnklemmen zur Zugprüfung von Garnen	36
Abbildung 17: Messaufbau zur Bestimmung der Dichte	37
Abbildung 18: Prüfaufbau nach ASTM D 6611 (aus [AST00]).....	38
Abbildung 19: Faserstruktur-Abrasions-Prüfstand nach [Geb11].....	39
Abbildung 20: Umschlingungswinkel von Garnen im Versuchsaufbau nach ASTM D 6611	40
Abbildung 21: Sedimentationseffekte bei der Gel-Chromatographie (aus [Det67]) ..	42
Abbildung 22: Messsystem zur Durchführung der DSC	47

Abbildung 23: Aufbau zur Bestimmung der Bruchkraft nach DIN EN ISO 2307	49
Abbildung 24: Kraft-Zeit-Verlauf bei der Bestimmung der Bruchkraft nach DIN EN ISO 2307	50
Abbildung 25: Schema der Dauerbiegung als Einfachbiegung (nach [VDI84]).....	51
Abbildung 26: Aufbau für Dauerbiegeversuche an WBM 25.....	52
Abbildung 27: Thermofixieranlage Rope Liner.....	54
Abbildung 28: Boxplot mit Maßzahlen (aus [Sac07])	56
Abbildung 29: Zugfestigkeiten der untersuchten Garne.....	62
Abbildung 30: Zugfestigkeiten der untersuchten Garne mit erhöhter Probenanzahl für TNX®	63
Abbildung 31: Bruchzyklenzahlen der Litzen aus UHMW Polyethylen im Garnabrasionsversuch nach ASTM D 6611	65
Abbildung 32: Molmasseverteilung der UHMW Polyethylenfasern aus der GPC- Analyse	67
Abbildung 33: Abschätzung der Beziehung zwischen Festigkeit und Schmelzenthalpie	69
Abbildung 34: Fehler in einem Eosten®-Garn	71
Abbildung 35: Gebrochener Garnspleiß in einem Eosten®-Garn	71
Abbildung 36: Bruchspannungen der Seile aus UHMW Polyethylen.....	74
Abbildung 37: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Dyneema® SK75 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm	76
Abbildung 38: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Spectra® S1000 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm	77
Abbildung 39: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus TNX® bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm	77
Abbildung 40: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Eosten® FT093 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm	78
Abbildung 41: Silikonschnelltest an Faserseilen aus UHMW Polyethylen-Fasern....	80
Abbildung 42: Einfluss der Biegelänge auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus UHMW Polyethylen bei $D/d = 12,5$ und $\sigma_E = 100 \text{ N/mm}^2$	83

Abbildung 43: Spezifische Festigkeit der Seile aus Dyneema® SK75 nach dem Thermofixieren	85
Abbildung 44: Spezifische Festigkeit der Seile aus Spectra® S1000 nach dem Thermofixieren	85
Abbildung 45: Spezifische Festigkeit der Seile aus TNX® nach dem Thermofixieren	86
Abbildung 46: Spezifische Festigkeit der Seile aus Eostan® FT093 nach dem Thermofixieren	86
Abbildung 47: Bruchspannung der Seile aus Dyneema® SK75 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C	88
Abbildung 48: Bruchspannung der Seile aus Spectra® S1000 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C	89
Abbildung 49: Bruchspannung der Seile aus TNX® nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C	89
Abbildung 50: Bruchspannung der Seile aus Eostan® FT093 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C	90

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Zielstellung der Arbeit.....	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Geschichtliche Entwicklung von Faserseilen und Chemiefasern.....	3
2.2	Seile in fördertechnischen Anwendungen	6
2.3	Herstellung von Faserseilen	8
2.3.1	Schlagen von Faserseilen.....	9
2.3.2	Flechten von Faserseilen	10
2.3.3	Parallelanordnung mit geflochtenem Mantel	12
2.3.4	Thermofixieren von Faserseilen.....	14
2.4	Prüfung von Faserseilen.....	16
2.5	Fasern aus UHMW-Polyethylen	18
2.5.1	Faserherstellung im festen Aggregatzustand.....	19
2.5.2	Faserherstellung aus der Polymerschmelze	20
2.5.3	Faserherstellung über Polymerlösungen	21
2.5.4	Relevante Verfahren	22
2.5.5	Allgemeine Eigenschaften der Fasern	23
2.6	Bewertung des Standes der Technik.....	26
3	Versuchsdurchführung	29
3.1	Probenbeschreibung	29
3.1.1	Allgemeine Eigenschaften der ausgewählten Garne	30
3.1.2	Seilparameter.....	32
3.2	Versuchsprogramm	33
3.3	Versuchsaufbauten, Normen und Parameter	35
3.3.1	Zugversuch an Garnen nach DIN EN ISO 2062	35
3.3.2	Dichtebestimmung	37
3.3.3	Garnabrasionsversuche	38
3.3.4	Bestimmung der Verteilung der molaren Masse	41
3.3.5	Dynamische Differenzkalorimetrie	46
3.3.6	Prüfung der Eigenschaften von Faserseilen nach DIN EN ISO 2307 ...	48
3.3.7	Dauerbiegeversuche nach VDI 2358	51
3.3.8	Thermofixierversuche	54
3.3.9	Statistische Auswertung.....	56

3.4	Versuchsplan.....	58
4	Ergebnisse und Bewertung	60
4.1	Eigenschaften der Garne aus UHME Polyethylen	60
4.1.1	Zugfestigkeit.....	60
4.1.2	Abrasionsbeständigkeit.....	64
4.1.3	Morphologie	66
4.2	Eigenschaften der Seile.....	70
4.2.1	Geometrische Eigenschaften	70
4.2.2	Festigkeitseigenschaften	73
4.2.3	Verhalten unter Dauerbiegung	75
4.2.4	Thermofixierbarkeit	84
5	Abschätzung der Marktpotentiale anhand der Kosten der Seilherstellung	92
6	Zusammenfassung	97
7	Ausblick	100
8	Literaturverzeichnis	102

1 Motivation und Zielstellung der Arbeit

Faserseile erlangen in fördertechnischen Anlagen immer mehr Bedeutung (vgl. [Nen09]), da sie gegenüber Stahldrahtseilen und Rundstahlketten einige Vorteile in der Anwendung bieten. In zahlreichen Literaturquellen, die nicht nur Faserseile im Allgemeinen, sondern zielgerichtet Vor- und Nachteile von Faserseilen gegenüber Drahtseilen in fördertechnischen Anwendungen behandeln (z.B. [Hei13], [McK04], [Mic10], [Nen09]), werden Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Faserseilen im qualitativen Vergleich mit Stahldrahtseilen beschrieben. Dort werden vorrangig Eigenschaften wie Festigkeit, Dichte, spezifische Festigkeit, Dehnung bei Nutzlast, Bruchdehnung und andere Eigenschaften bewertet. Nähert man sich jedoch fördertechnischen Anwendungen von einem wirtschaftlichen Standpunkt, so wird schnell ersichtlich, dass nicht nur die Leistungseigenschaften der Seile aus Synthesefasern von Bedeutung für eine erfolgreiche Anwendung sind, sondern sowohl für Maschinen- und Anlagenhersteller als Zulieferer z.B. von Verschleißbauteilen, als auch für die Anwender, in Hinblick auf zu erwartende Betriebs-, Wartungs- und Instandhaltungskosten, die Kosten des Faserseiles einen nicht unwesentlichen Faktor bei der Entscheidungsfindung für ein Zugmittel darstellen.

Bei Betrachtung von Preislisten für Stahldrahtseile von Konfektionierungsbetrieben (z.B. [Gru11]) bzw. Händlern, kann festgestellt werden, dass die Preise für Stahldrahtseile nicht nur vom Seildurchmesser sondern ebenfalls stark von der Machart abhängig sind. So beträgt der Preis für ein Stahldrahtseil 6x19 FE (6 Litzen zu je 19 Drähten; Faserkerneinlage) mit einem Nenndurchmesser von 6 mm circa 1,05 € je laufenden Meter, während der Preis für ein Seil 6x19 Warrington-Seale + SES (6 Litzen zu je 19 Drähten; Stahlkerneinlage) mit einem Nenndurchmesser von 6 mm bei ca. 1,94 € je Laufmeter liegt [Gru11].

Generell lässt sich erkennen, dass Drahtseile kostengünstige Maschinenelemente sind, welche durch die Erfahrung, Erforschung und Weiterentwicklung seit der Entwicklung der Drahtseile im Jahr 1834 durch Wilhelm August Julius Albert [Alb35] für viele Einsatzfälle ausreichend genau erforscht und definiert sind [Fey00]. Faserseile aus Synthesefasern sind dagegen vergleichsweise jung, der Kenntnisstand wurde jedoch in den vergangenen Jahren stetig verbessert [Hei13] [McK04] [Mic10].

Um ein textiles Halbzeug, welches das Seil aus Sicht des Maschinenbauers darstellt, zur Verwendung in fördertechnischen Anwendungen wie Aufzügen, Kränen und Schleppwinden, bei denen die Maschinenteknik einem starken Wettbewerb unterliegt, am Markt etablieren zu können, müssen daher neben den Leistungseigenschaften zusätzlich ökonomische Faktoren berücksichtigt werden. Von den vielen am Fasermarkt vorhandenen Polymerfasern haben sich vor allem Fasern aus dem ultrahochmolekularem Polyethylen Dyneema® SK75 für Faserseile in fördertechnischen Anwendungen durchgesetzt (vgl. Abb. 1), da Sie über viele vorteilhafte Eigenschaften wie geringe Dichte, gute Abrasionsbeständigkeit, gute Biegewechselbeständigkeit, moderate Dehnung, welche durch thermomechanische Behandlung weiter reduziert werden kann [Hei13] [HeM11], und gute Korrosionsbeständigkeit [McK04] verfügen.



Abbildung 1: Aufstiegswinde mit Dyneema®-Seil (Ø 16 mm) auf einem Forwarder für Holzurückarbeiten am Steilhang

Problematisch ist, dass hochfeste Polymerfasern nicht zu den preisgünstigen Massenkunststoffen gehören, sodass in vielen Fällen Stahlseile gewählt werden, obwohl ein Faserseil gleiche oder bessere Laufzeiten (vgl. [Hei13]) erzielen könnte. Ein aus dem Fasertyp Dyneema® SK75 geflochtenes Faserseil mit einem Nenndurchmesser von 6 mm und Festigkeitseigenschaften, die mit einem Stahlseil gleichen Durchmessers vergleichbar sind, kostet ca. 1,60 € - 1,90 € (nach [Geo10]), was im Vergleich zu Stahldrahtseilen bereits am oberen Ende der Preisspanne liegt (vgl. auch [Gru11]).

Zielstellung der Arbeit ist deshalb, neben dem am Markt etablierten Fasertyp Dyneema® SK75, weitere am Markt verfügbare Polyethylenfasern mit zum Teil niedrigeren Preisen im qualitativen Vergleich auf ihre Eignung für fördertechnische Anwendungen zu untersuchen. Ein kostengünstigeres Material mit gleichen Leistungseigenschaften oder ein kostenmäßig gleichwertiges Material mit überlegenen Leistungseigenschaften könnte einen Anreiz für einen verstärkten Einsatz von Faserseilen aus ultrahochmolekularen Polyethylenfasern in fördertechnischen Anwendungen schaffen.

Um die Aussagen der Versuchsergebnisse auf tatsächlich relevante Materialeigenschaften zurückführen zu können und Einflüsse unterschiedlicher Seilkonstruktionen so weit wie möglich auszuschließen, werden alle Versuche, welche an Seilen durchzuführen sind, an geflochtenen Seilen mit einer einheitlichen Seilkonstruktion durchgeführt.

2 Stand der Technik

Die historische Entwicklung der Faserseile und der Polymerfasern sind Themen, welche bereits in zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Veröffentlichungen beleuchtet wurden. Daher soll hier ein kurzer Überblick mit Fokus auf die Entwicklung der Chemiefasern gegeben werden. Für detaillierte Informationen sei hier auf das 'handbook of fibre rope technology' [McK04] sowie auf wissenschaftliche Arbeiten zu hochfesten Faserseilen (z.B. [Hei13], [Mic10]) verwiesen.

2.1 Geschichtliche Entwicklung von Faserseilen und Chemiefasern

Faserseile gehören zu den ältesten textilen Gebilden die bekannt sind. Nach [McK04] wurden bereits in prähistorischen Zeiten von einigen Tieren Pflanzenschlingen genutzt, um Bäume zu erklimmen oder sich von Baum zu Baum zu schwingen.

Seile wurden bereits weit vor Beginn der geschichtlichen Aufzeichnungen eingesetzt, was durch zahlreiche Seilartefakte nachgewiesen werden kann. Eine Vielzahl von Höhlenmalereien zeigen Darstellungen von Personen, die seilartige bzw. strangähnliche Gebilde als Hilfe beim Klettern benutzen. Selbst Artefakte von Fischernetzen, mit einem Alter von mehr als 10.000 Jahren, sind bekannt [McK04].

Es wurden hauptsächlich natürlich vorkommende Werkstoffe (z.B. Kokos, Manila-Hanf, Sisal, Baumwolle,...) oder bearbeitete Naturwerkstoffe (z.B. Lederriemen) zur Herstellung von Seilen verwendet, bis Oberbergrat Wilhelm August Julius Albert im Jahr 1834 das erste Seil aus Stahldrähten entwickelte [Alb35].¹

Stahldrahtseile verdrängten die Seile aus Naturfasern sehr schnell aus technischen Anwendungen, da sie aufgrund ihrer höheren Festigkeit (ca. 6-mal höher als Hanf) deutliche Vorteile beim Befördern von Lasten boten [McK04].

In den 1930er Jahren begannen die ersten Entwicklungen im Bereich der synthetischen Fasern. So waren sogenannte 'rayon'-Fasern am Markt verfügbar, die aus natürlicher Zellulose hergestellt wurde, jedoch in der Seilherstellung kaum Verwendung fanden [McK04]. Die ersten Fasern, die einen bezeichnenden Einfluss auf die Seilherstellung und Seilanwendung in technischen Bereichen hatten, waren die von E. I. du Pont de Nemours and Company (kurz: DuPont) entwickelten Polyamidfasern, die seit 1939 unter dem Handelsnamen Nylon® kommerziell verfügbar waren.

Mit der Entwicklung weiterer Polymerfasern wie Polyethylenterephthalat (PET)-Fasern, Polyethylenfasern und Polypropylenfasern, standen weitere Chemiefasern zur Verfügung, die durch ihre speziellen Eigenschaften das Polyamid aus einigen Bereichen verdrängten [McK04]. Durch die Entwicklung von hochfesten Polymerfasern (HM-HT-Fasern) fanden die geflochtenen Faserseile Einzug in technische Anwendungen, die bisher den Stahlseilen vorbehalten waren. Die erste in technischen Anwendungen eingesetzte HM-HT-Faser war die von DuPont entwickelte Para-Aramidfaser Kevlar®, welche ab den 1970er Jahren kommerziell verfügbar war [Yan92]. Die stetig fortschreitende Entwicklung auf dem Sektor der Chemiefasern brachte etwa 10 Jahre später die erste ultrahochmolekulare (UHMW; engl. ultra high molecular weight) Polyethylenfaser hervor. Viele Unternehmen entwickelten nun Herstellungsverfahren für ultrahochmolekulare Polyethylenfasern (z.B. DSM Dyneema, Toyobo, Allied Fibers; vgl. [McK04]. Aber auch Aramidfasern² wie Technora® oder Twaron® von Teijin Aramid entstanden [McK04].

¹ Albert beschreibt in seiner Veröffentlichung [Alb35] Seile aus Eisendrähten. Nachforschungen beim Archiv des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie in Niedersachsen ergaben, dass die Eisendrähte für das Albert-Seil während der Herstellung mehrfach in Kohlefeuern geglüht wurden, wobei Eisen nach heutigen Erkenntnissen Kohlenstoff aufnimmt (vgl. [Sta04]). Die Definition von Stahl wurde erstmals im Jahr 1960 in der Euronorm 20, einem Vorgängerdokument der heute gültigen DIN EN 10020 (siehe [DIN00]), festgeschrieben. Die von Albert entwickelten Seile aus „Eisendraht“ (Zitat aus [Alb35]) gelten daher nach heutiger Definition als Stahldrahtseile.

² Aramid ist ein Kunstwort, welches aus der chemischen Bezeichnung **A**romatisches **P**oly**a**mid entstanden ist.

Heute sind geflochtene Seile aus HM-HT-Fasern bereits in einigen Anwendungen im Einsatz, die vorher Stahlseilen vorbehalten waren. So sind z.B. Aufzugsseile aus Aramidfasern (vgl. Abb. 2 und [Kur13]) genauso bekannt, wie Schlepp- und Aufstiegswinden mit textilen Seilen im Forstsektor (vgl. Abb. 1) und in der Landwirtschaft.



Abbildung 2: Aufzugsseil SchindlerAramid der Schindler Aufzüge AG (Schweiz)

Seile aus synthetischen Polymerfasern erreichen heute Mindestbruchkräfte, die mit denen von Stahlseilen gleichen Nenndurchmessers vergleichbar sind (vgl. Tab. 1), was den Einsatz in bisher vorrangig drahtseilbasierten Anwendungen ermöglicht.

Tabelle 1: Ausgewählte Eigenschaften von Stahl- und Faserseil im Vergleich

Bezeichnung	8x19 Filler mit Stahleinlage 7x7 (Abb. 3, links)	Dyneema®-Seil (Abb. 3, rechts)
Nenndurchmesser	7 mm	7 mm
Material	Stahldraht	UHMW Polyethylen (Dyneema® SK75)
Machart	geschlagen	geflochten; thermofixiert
Bruchkraft	40 kN	49 kN
Seilfeinheit	209 g/m = 209 ktex	26,3 g/m = 26,3 ktex
Spezif. Festigkeit	181,39 N/ktex	1863,11 N/ktex
Preis (Netto)	2,40 €/m	3,00 €/m



Abbildung 3: Geschlagenes Stahlseil 8x19 Filler+SE 7x7 Ø7 mm (links) und geflochtenes Faserseil aus Dyneema SK75 Ø7 mm (rechts)

2.2 Seile in fördertechnischen Anwendungen

Seile dienen in der Fördertechnik vorrangig zum Übertragen von Zugkräften. Dabei wird zwischen stehenden und laufenden Seilen unterschieden [Fey00]. Stehende Seile sind solche Seile, die als Abspannseile, z.B. für Krantragwerke oder Schiffsmasten, oder zum Sichern von Lasten auf Ladeflächen eingesetzt werden. Sie werden dabei vorrangig mit Zug- oder Zugschwellbelastungen beaufschlagt. Als laufende Seile werden solche Seile bezeichnet, die in Kränen, Aufzügen und Schachtförderanlagen nicht nur die Last des zu fördernden Gutes aufnehmen, sondern gleichzeitig eine Bewegung des Fördergutes über eine bestimmte räumliche Distanz (z.B. Höhenunterschiede) ermöglichen. Häufig werden solche Seile dazu über Umlenkscheiben gebogen oder auf Seiltrommeln gespult [Fey00].

In aktuellen Anwendungen in der Fördertechnik werden vorrangig Seile aus Stahldrähten eingesetzt. Das ist vor allem mit dem unzureichenden Untersuchungs- und Erkenntnisstand zu Faserseilen zu begründen, der eine sichere und anwendungsgerechte Dimensionierung von Faserseilen derzeit nicht für alle Anwendungen zulässt. Faserseile sind daher nur vereinzelt in speziellen Anwendungen zu finden, wo entweder ein Versagen des Seiles mit geringen Risiken behaftet ist [Hei13], oder die Vorteile der Faserseile bezüglich Dichte, Handhabung und Biegeflexibilität die Risiken deutlich überwiegen.

Die technische Entwicklung ist jedoch in zunehmendem Maße auf große Förderlängen ausgerichtet. Im Bergbau werden inzwischen Tiefen von mehr als 3000 Metern als Zielgröße definiert [MaH14]. Solche Förderhöhen sind in Schachtförderanlagen bisher nur durch Förderung über mehrere Förderstufen oder über eine drastische, förderlängenbezogene Reduktion der Sicherheitsfaktoren [MaH14] realisierbar.

Allerdings wird durch die Reduktion der Sicherheitsfaktoren die Lebensdauer von Drahtseilen signifikant verkürzt (vgl. [Fey00], [MaH14]), was zu einem erhöhten Bedarf an Förderseilen führt.

Das Fördern über mehrere Förderstufen verursacht zusätzliche Energiekosten für den Betrieb, die Prüfung und die Wartung der zusätzlichen Förderstufen. Bei Verwendung von Faserseilen unter Beachtung der derzeit für Drahtseile geltenden Sicherheitsfaktoren könnten größere Förderlängen bei gleichzeitig höheren Nutzlasten realisiert werden (vgl. Abb. 4; aus [MaH14]).

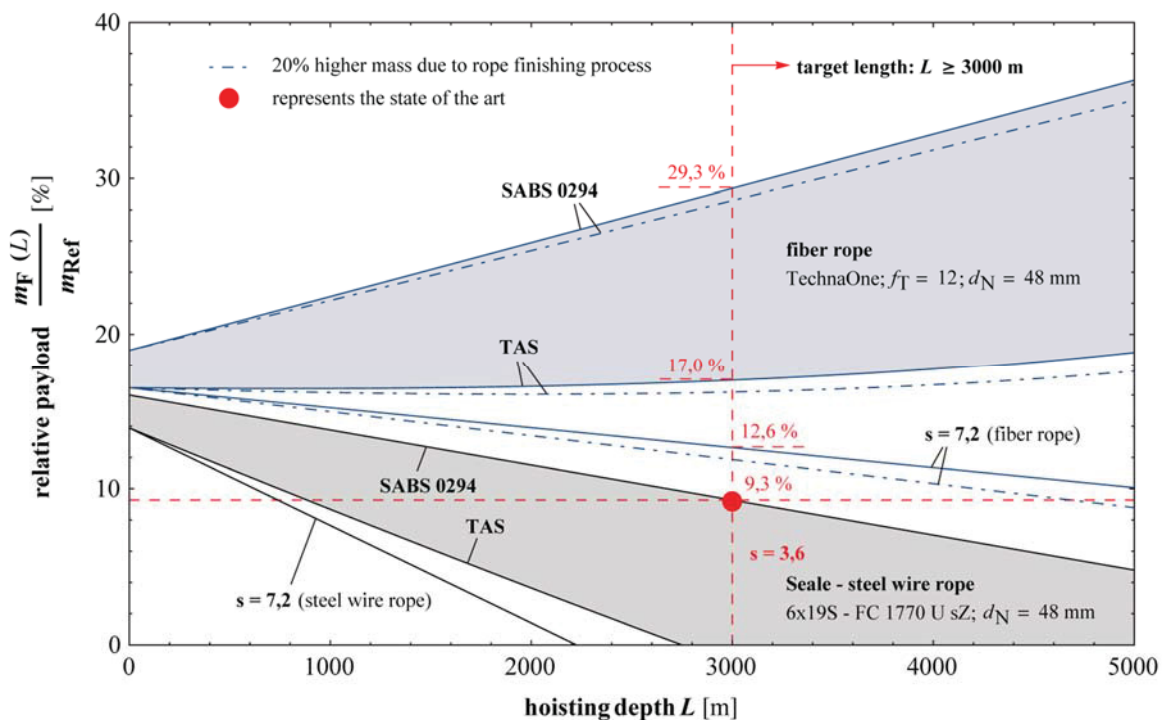


Abbildung 4: Beziehung zwischen relativer Nutzlast, Fördertiefe und Sicherheitsfaktoren bei Draht- und Faserseilen (aus [MaH14])

In Abbildung 4 wird gezeigt, dass Faserseile unter Verwendung der förderlängenbezogenen Sicherheitsfaktoren selbst bei steigenden Förderhöhen höhere relative Nutzlasten (Verhältnis zwischen zulässiger Nutzlast und Belastung bis Seilbruch) erlauben. Das liegt daran, dass die längenbezogenen Sicherheitsfaktoren mit steigender Förderlänge stärker abnehmen als die Masse des freien Förderseiles steigt [MaH14].

Im Hochbau sind Bauhöhen von über 600 Metern und keine Seltenheit mehr (z.B. Burj Khalifa in Dubai mit einer Höhe von 828 Metern). Dabei stehen fördertechnische Anwendungen wie Kräne und Aufzüge vor neuen Herausforderungen.

Beim Bau extrem hoher Gebäude ist es anzustreben, maximale Förderhöhen mit einem einzelnen Kran erreichen zu können, da sonst bei der bautechnischen Auslegung der Hochhäuser Verankerungsmöglichkeiten für Kräne am Rohbau vorgesehen werden müssen. Außerdem ist es für die in den Hochhäusern befindlichen Aufzüge ein Zielkriterium, mit möglichst wenigen Umsteigevorgängen die höchsten Etagen zu erreichen. Derzeit sind, bedingt durch die Normen im Aufzugsbau und das hohe Gewicht der Drahtseile, Aufzugshöhen oberhalb von 650 Metern nicht realisierbar [Fey00]. Legt man einen Sicherheitsfaktor von $s = 7,2$ zu Grunde, so ist in Abbildung 4 ersichtlich, dass bei Verwendung des dort gezeigten Stahlseiles eine relative Nutzlast von ca. 10% bei einer Förderhöhe von 650 m zulässig wäre, während unter Verwendung des in Abbildung 4 genannten Faserseiles bei gleichem Sicherheitsfaktor und der gleichen Förderhöhe ca. 15% relative Nutzlast zulässig wären, was bei einem Kran eine ca. 50% höhere Nutzlast bedeutet.

Damit zeigt sich, dass Faserseile für technische Anwendung zukünftig eine sinnvolle Alternative zum Drahtseil darstellen, wenn der Untersuchungsstand ausreichend verbessert werden und damit eine sichere Lebensdauerabschätzung erfolgen kann.

2.3 Herstellung von Faserseilen

Nach „DIN EN ISO 1968 – Faserseile und Tauwerk“ wird als Seil jedes Erzeugnis definiert, bei dem aus drei oder mehr Litzen durch Flechten, Schlagen oder paralleles Anordnen ein Tauwerkprodukt mit einem Durchmesser von mindestens 4 mm entsteht [DIN05].

Als Ausgangspunkt der Seilfertigung gilt bei Faserseilen die Faser, auch als Filament bezeichnet. Die Fasern werden als Filamentbündel geliefert, die als Garne bezeichnet werden. Aus den Garnen werden durch Fachen (Zusammenführen mehrerer Garne ohne Verzwirnen) oder Verzwirnen (Verdrehen) zu Litzen oder durch Flechten von einzelnen oder gefachten oder gezwirnten Garnen die Litzen als Vorstufe des Seiles hergestellt [McK04]. Bei der Herstellung der Litzen können ein- und mehrstufige Zwirne verarbeitet werden (vgl. Abb.5 und [Ber11]). Durch Verdrehen der Litzen (auch Schlagen), Flechten oder Parallelanordnung der Litzen mit anschließendem Erzeugen eines Mantels, z.B. textiler Mantel durch Flechten, entsteht das Seil [DIN05] [Ber11].

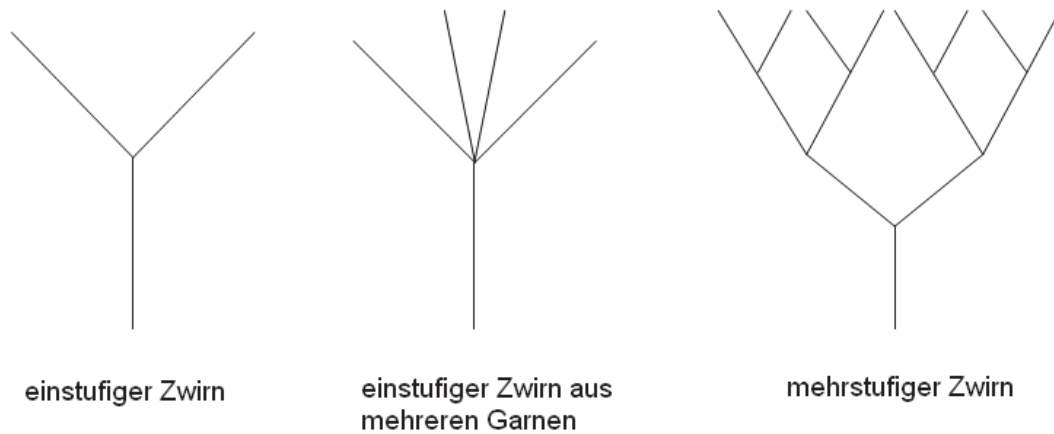


Abbildung 5: Zwiirne zur Litzenherstellung (in Anlehnung an [Ber11])

2.3.1 Schlagen von Faserseilen

Das Schlagen oder auch Drehen von Seilen aus Fasern ist vor allem bei Seilen für Anwendungen in der Seefahrt sowie in der Erdölförderung verbreitet. Dabei werden drei oder mehr Litzen, die aus gefachten oder gezwiirnten Garnen bestehen, durch Verdrehen der Litzen umeinander zu einem Seil verarbeitet (vgl. Abb. 6).



Abbildung 6: Schema zum Schlagen eines 3-litzigen Seiles

Die üblichsten Vertreter sind 3-litzige (vgl. Abb.7) und 4-litzige Seile, jedoch sind drahtseilähnliche Konstruktionen (vgl. Kap. 1, Abb. 2) mit und ohne Kerneinlage sowie Hybridseile aus Stahldrähten und Polymerfasern ebenso bekannt und Stand der Technik [McK04].

Die Eigenschaften der geschlagenen Seile werden maßgeblich durch folgende Parameter bestimmt:

- Werkstoff/Werkstoffkombination
- Titer (Garnfeinheit), Garnanzahl und Zwirnung der Litzen
- Anzahl der Litzen
- Schlaglänge des Seiles
- Schlagart (Kabel- oder Trossenschlag)



Abbildung 7: Im Trossenschlag geschlagenes, 3-litziges Seil aus Polypropylen

2.3.2 Flechten von Faserseilen

Das Flechten ist ein weiteres Verfahren zur Herstellung von textilen Seilen. Hier werden die Litzen jedoch nicht umeinander verdreht, sondern werden in entgegengerichteten Helixbahnen umeinander herum gelegt und dabei überkreuzt (vgl. Abb. 8), wobei jeweils ein Teil der Litzen im Uhrzeigersinn, die anderen Litzen gegen den Uhrzeigersinn laufen.

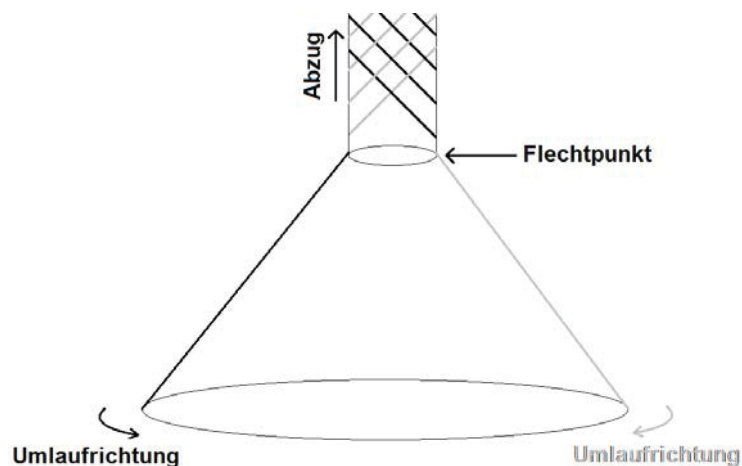


Abbildung 8: Schema zum Flechten von Seilen in einflechtiger Bindung

Geflochtene Seile haben den Vorteil, dass sie sich, im Gegensatz zu geschlagenen Seilen, unter Zugbelastung nicht aufdrehen. Weiterhin entstehen im geflochtenen Faserseil beim Biegen nicht, wie das z.B. beim klassischen Biegebalken geschieht, Zug- und Druckzonen, sondern ein Zugspannungsverlauf über den Seilquerschnitt, weil die Litzen aneinander abgleiten und so einen Längenausgleich realisieren können. Da sich der nahezu runde Querschnitt unter Last ovalisiert [Hei13] [Mic10] [Loh13], wird eine gleichmäßigere Verteilung der Zugspannung über den Querschnitt erreicht, und das Verhältnis zwischen kleinster und größter Zugspannung sinkt. Weiterhin wirkt sich dieser Effekt positiv auf die Grenzbiegeradien aus, die sich durch die auftretende Ovalisierung und die damit zusammenhängende Abplattung verringern [Mic10].

Häufig in technischen Anwendungen verwendete Geflechte sind (nach [McK04]):

- Rundgeflecht: 12 Litzen, ohne Mantel (vgl. Abb. 9)
- Quadratgeflecht: 8 Litzen, ohne Mantel
- Doppelgeflecht: 8 oder 12 Litzen im Kern mit 16- , 24- oder 32-litzigem, geflochtenem Mantel (vgl. Abb. 10)



Abbildung 9: Rundgeflecht aus 12 gezwirnten Litzen



Abbildung 10: Doppelgeflecht mit 12-litzigem Kern und 16-litzigem Mantel

Wie schon bei den geschlagenen Seilen gezeigt, sind die Eigenschaften der geflochtenen Seile ebenfalls von mehreren Parametern abhängig:

- Werkstoff des Kerns
- Titer und Zwirnung der Litzen im Kern
- Anzahl der Litzen im Kern
- Flechtlänge des Kerns
- Bindung des Kerns (1-flechtig, 2-flechtig, 3-flechtig)

und, falls vorhanden:

- Werkstoff des Mantels
- Titer und Zwirnung der Litzen im Mantel
- Anzahl der Litzen im Mantel
- Flechtlänge des Mantels
- Bindung des Mantels (1-flechtig, 2-flechtig, 3-flechtig)

2.3.3 Parallelanordnung mit geflochtenem Mantel

Parallelanordnungen mit geflochtenem Mantel werden häufig als Kernmantelseile bezeichnet. Dabei wird das Flechten des Mantels analog zur Herstellung eines Doppelgeflechtes ausgeführt, jedoch wird kein geflochtener Kern sondern eine Anordnung parallel liegender Litzen als Kern zugeführt. Solche Konstruktionen bieten den Vorteil, dass eine durch Flechten oder Schlagen der Kernlitzen bedingte Strukturdehnung nicht auftritt. Jedoch sind Kern-Mantel-Konstruktionen mit gestreckt im Kern liegenden Litzen (vgl. Abb. 11) nicht zum Lauf über Scheiben geeignet. Durch den fehlenden Längenausgleich, der z.B. bei geflochtenen Seilen über ein Abgleiten der Litzen aneinander realisiert wird, bilden sich beim Lauf über Scheiben, ähnlich wie beim klassischen Biegebalken, Zug- und Druckzonen aus. Hochfeste Polymerfasern sind jedoch sehr empfindlich gegen axiale Druckbelastungen und neigen sehr stark zum Knicken [Rob69] [Cha95], sodass solche Seile unter wechselnden Biegebelastungen und den daraus resultierenden Zug-Druck-Wechseln sehr schnell versagen würden. Aus diesem Grund sind Kern-Mantel-Konstruktionen als laufende Seile in technischen Anwendungen weniger relevant.



Abbildung 11: Kernmantelseil (gezwirnte Litzen im Kern; einflechtig geflochtener Mantel)

Für weitere Betrachtungen in dieser Arbeit wurden ausschließlich 12-litzige Rundgeflechte mit einem Nenndurchmesser von 6 mm verwendet, da deren Eignung als laufende Seile in [Hei13] und [Mic10] bereits untersucht und nachgewiesen wurde. Generell kann man feststellen, dass der Erkenntnisstand zur Dimensionierung und Lebensdauerabschätzung bei Faserseilen, verglichen mit Stahldrahtseilen, unzureichend ist, obschon in den vergangenen Jahren einige wissenschaftliche Arbeiten auf diesem Gebiet veröffentlicht worden sind (z.B. [Hei13] und [Mic10]).

Bereits bei der Auswahl des Werkstoffs wird, bedingt durch dessen chemische Zusammensetzung und den damit einher gehenden mechanischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften, das Eigenschaftsprofil eines Seiles mit mehreren Faktoren beeinflusst. So sind z.B. folgende spätere Eigenschaften des Seiles ausschließlich von den Eigenschaften des Werkstoffes abhängig:

- Einsatztemperatur
- Feuchtigkeitsaufnahme
- Festigkeitsverluste unter Wassereinfluss
- Hydrolyseanfälligkeit
- Beständigkeit gegen Chemikalien und Umwelteinflüsse/Korrosion
- Verhalten bei Faser-Faser-Reibung
- Haftung von Beschichtungsstoffen
- Eignung zur thermisch-mechanischen Behandlung
- Schrumpfen unter Einwirkung von thermischer Energie bei lastfreiem Seil
- Ausgasen von Weichmachern und Prozesshilfsmitteln

Zusätzlich werden einige Eigenschaften des Seiles durch die Kombination aus Werkstoff und Seilkonstruktion, wobei hier nachgeschaltete Veredlungsprozesse inbegriffen sind, beeinflusst:

- Verhalten bei Dauerbiegung bzw. Wechselbiegung [Hei11] [Hei13]
- Zugfestigkeit [Hei11] [Hei13] [Mic10]
- Bruchdehnung und Dehnung unter Betriebslast [Hei11] [Hei13] [HeM11]
- Relaxation und Retardation [Bar00] [Dom05] [Hei13] [McK04]
- Anfälligkeit gegen Abrasion [McK04]
- UV- und Witterungsbeständigkeit [Gup05] [MaR12] [Mam12] [McK04] [Zha03]

2.3.4 Thermofixieren von Faserseilen

Das Thermofixieren ist ein Prozess der thermisch-mechanischen Veredlung von Textilien, mit vielfältigen Zielen. Neben der Herstellung geforderter Maßhaltigkeiten, sind Effekte wie Erhöhen der Festigkeit, Reduzieren der strukturellen Dehnung, Verringern der Schrumpfneigung beim Wärmeeintrag und andere erreichbar [HeM11] [Hei13] [Mam14] [Mic13] [Völ06].

Bei Faserseilen hat sich das Thermofixieren bereits als fester Produktionsschritt etabliert, vorrangig mit dem Ziel der Erhöhung der Festigkeit der hergestellten Faserseile bei gleichzeitiger Reduzierung der Betriebsdehnung [Hei13] [Mam14] [Mic13]. Die Seile werden mit einer Last beaufschlagt und auf eine werkstoffabhängige Temperatur erwärmt, wobei eine Erwärmung bis in den Kern über eine Aufwärmzeit sicherzustellen ist. Um optimale Festigkeitssteigerungen zu erreichen, werden in der Literatur Haltezeiten (nach dem vollständigen Durchwärmen) von ca. 3 Minuten als zielführend genannt [HeM11] [Mic13].

Abbildung 12 zeigt den schematischen Aufbau einer kontinuierlich arbeitenden Reckeinheit, die in Kombination mit einer Heizstrecke, welche den freien Seilbereich beheizt, für eine kontinuierliche Thermofixierung von Faserseilen eingesetzt werden kann. Vergleichbare Systeme haben sich für die Seilveredlung durchgesetzt und werden von diversen Maschinenherstellern als Serienmaschinen speziell für die Veredlung bzw. thermisch-mechanische Behandlung von Faserseilen vertrieben.

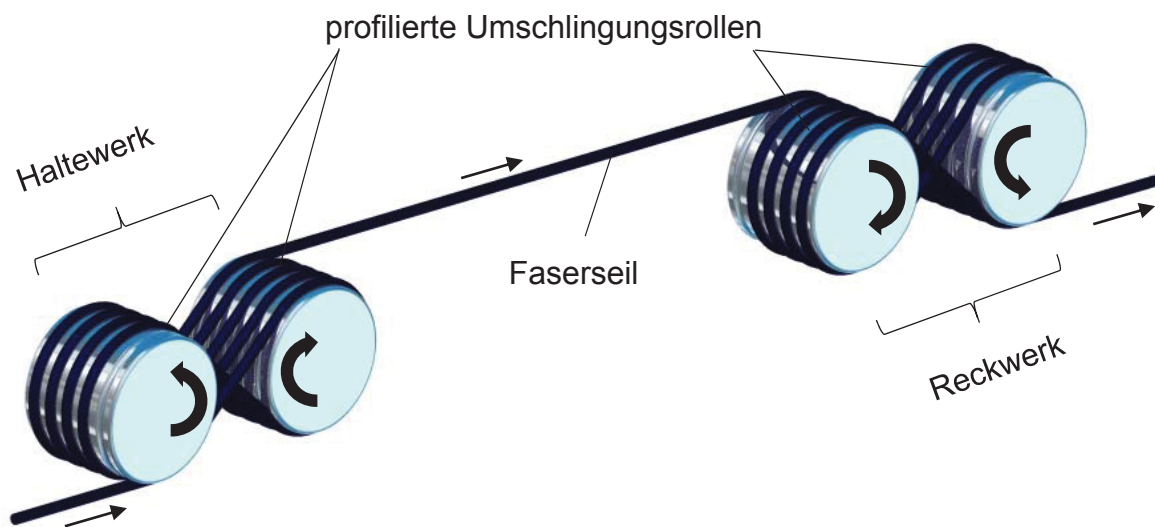


Abbildung 12: Schema einer Reckeinheit zum kontinuierlichen Thermofixieren von Faserseilen

Die für das Thermofixieren erforderliche Kraft wird über eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem zuführenden Haltewerk und dem abziehenden Reckwerk erzeugt. Die Umschlingungen bewirken über Umschlingungsreibung, dass das einlaufende und auslaufende Seil nur mit einer geringen Vorspannkraft beaufschlagt werden müssen, um zwischen den Haltewerken die nötige Fixierspannung zu erzeugen.

Über einen ausreichend großen Wareninhalt in der Heizstrecke kann auch bei hohen Durchlaufgeschwindigkeiten und großen Seildurchmessern gewährleistet werden, dass das Seil (nach dem Durchwärmen) für die Dauer von ca. 3 Minuten unter Einwirkung von Kraft und thermischer Energie verbleiben kann. Als Medien zur Wärmeübertragung haben sich neben beheizter Luft noch Öl- und Wasserbäder in der Textilverarbeitung durchgesetzt. Bei Faserseilen ist allerdings das nachträgliche Entfernen von Öl oder das Trocknen der Seile erforderlich, weshalb sich hier Verfahren mit beheizter Luft weitestgehend durchgesetzt haben.

Beim Thermofixieren von Faserseilen überlagern sich mehrere Effekte, die in Kombination zu einer Erhöhung der Bruchfestigkeit der Seile und einer gleichzeitigen Reduzierung der Dehnung führen. Der erste Effekt besteht im Angleichen der fertigungsbedingten Unregelmäßigkeiten im Faserseil. In wissenschaftlichen Studien (z.B. [Hei13]) wurde festgestellt, dass die in Prüfnormen zur Ermittlung der Bruchkraft von Faserseilen (vgl. [DIN11]) vorgeschriebenen Lastzyklen vor der Prüfung bis Bruch die Seilstruktur setzen und damit für eine gleichmäßigere Lastverteilung im Seil

sorgen, was zu einer Erhöhung der gemessenen Bruchkraft und gleichzeitig zu einer Verringerung der Standardabweichung der Messwerte führt. Vergleichbare Effekte werden beim Belasten der Seile während des Thermofixierprozesses erzielt.

Überlagert wird dieser Effekt mit dem Erwärmen auf eine werkstoffspezifische Fixiertemperatur. In veröffentlichten Untersuchungen an Zwirnen wurde die These aufgestellt, dass es zu einer Änderung der Fasermorphologie kommt [HeM11]. In anderen, veröffentlichten Untersuchungen wurden thermofixierte Zwirne nach dem Thermofixieren entzwirnt und die Filamente im Rahmen einer dynamisch-mechanischen Analyse entlang der Faserachse belastet [Hei13]. Dabei wurden ein Anstieg der Werkstoffdämpfung und eine Minderung des E-Moduls ermittelt (vgl. [Hei13]). Diese Effekte könnten damit begründet werden, dass die Orientierung der Moleküle nach dem Thermofixieren der Zwirne nicht mehr mit der Faserlängsachse übereinstimmt, was die These der veränderten Fasermorphologie untermauert. Da die Temperaturen beim Thermofixieren unterhalb der Schmelztemperatur und damit weit unterhalb der Zersetzungstemperatur liegen, können beim Thermofixieren ablaufende Prozesse nur physikalischer Natur sein. Chemische Reaktionen sind ausgeschlossen, da keine Reagenzien beigefügt werden, und Polyethylen ein Werkstoff mit guter chemischer Beständigkeit ist [Bar00] [Dom05].

2.4 Prüfung von Faserseilen

Die Prüfung von Faserseilen bietet die Möglichkeit des direkten Vergleichs der Eigenschaften von Faserseilen mit denen von Stahlseilen. Normen zur Prüfung von Faserseilen sind vorhanden, jedoch beziehen sich diese meist auf spezielle Seile bzw. spezielle Anwendungen.

Tabelle 2 zeigt das Resultat einer Suche nach international gültigen Normen (ISO-Normen) zu Faserseilen im Normenkatalog des Beuth Verlags. Es ist ersichtlich, dass vorhandene Normen vorrangig für Seile aus speziellen Fasern oder für Seile einer bestimmten Machart bzw. für eine bestimmte Anwendung gültig sind, oder nur zur Begriffsklärung dienen. Die einzige international gültige Norm, die sich mit der Bestimmung physikalischer und mechanischer Eigenschaften von Faserseilen befasst und nicht auf eine bestimmte Anwendung oder ein bestimmtes Seil beschränkt ist, ist die Norm DIN EN ISO 2307.

Tabelle 2: Übersicht zu international gültigen Normen (ISO) für Faserseile

Norm	Titel	Ausgabejahr
ISO 1140	Faserseile - Polyamid - 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile	2012
ISO 1141	Faserseile - Polyester - 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile	2012
ISO 1181	Seile – Manila und Sisal – Spezifikation	2004
ISO 1346	Faserseile - Polypropylen-Splitfilm, Monofilament und Multifilament (PP2) und hochfestes Polypropylen-Multifilament (PP3) - 3-, 4-, 8- und 12-litzige Seile	2012
ISO 1968	Faserseile und Tauwerk - Begriffe	2005
ISO 1969	Faserseile - Polyethylen - 3- und 4-litzige Seile	2004
ISO 2307	Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften	2010
ISO 3730	Schiffbau - Verholwinden	2012
ISO 9554	Faserseile – Allgemeine Festlegungen	2010
ISO 10325	Faserseile - Hochmodulares Polyethylen - 8-litzige geflochtene Seile, 12-litzige geflochtene Seile und ummantelte Seile	2009
ISO 10547	Polyester-Faserseile – Doppelgeflechtausführung	2009
ISO 10554	Polyamid-Faserseile – Doppelgeflechtausführung	2009
ISO 10556	Faserseile Polyester/Polyolefin – Doppelfaser	2009
ISO 10572	Polyolefingemisch-Faserseile	2009
ISO 18692	Seile – Polyesterseile für Festmachleinen	2007
ISO/TS 14909	Faserseile für das Offshore-Positionshalten – Hochmodulares Polyethylen	2012

Generell gilt, dass der Untersuchungsstand zu Faserseilen, und damit einhergehend der Normungsstand, im Vergleich mit Stahldrahtseilen unzureichend ist. In den letzten Jahren sind allerdings einige wissenschaftliche Untersuchungen durchgeführt und publiziert worden (z.B. [Hei13], [Mic10]). Abbildung 13 zeigt näherungsweise den Untersuchungsstand von Faserseilen im Vergleich zu Drahtseilen.

Drahtseil	Parameter	Faserseil
●●●○	Seilkonstruktion	●●○○
●●●●	Ablegereife	●○○○
●●●○	Seilkern	●○○○
●●●●	Seildurchmesser	●●○○
●●●●	Scheibendurchmesser	●●○○
●●●○	Schrägzug	●○○○
●●●●	Schlaglänge	●●○○
●●●○	Umschlingung	●○○○
●●●●	Festigkeit Draht/Faser	●○○○
●●●●	Biegelänge	●●○○
●●○○	Werkstoffe	●●○○
●●○○	Rillengeometrie	●●○○
●●○○	Schmierstoffe/Beschichtungen	●○○○

● untersucht
 ○ nicht untersucht

Abbildung 13: Untersuchungsstand zu Stahldraht- und Faserseilen (nach [Mic12])

Bedingt durch die Tatsache, dass der Stand von Erforschung und Entwicklung bei Faserseilen nicht so weit fortgeschritten ist wie bei Stahldrahtseilen, ist die Anzahl an verfügbaren, international gültigen Normen vergleichsweise gering. Aufgrund dessen wurden für die Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften, die in Kapitel 3.3 genauer erläutert werden, teilweise Prüfungen gewählt, die nicht speziell auf Faserseile abgestimmt oder noch nicht normativ beschrieben sind.

2.5 Fasern aus UHMW-Polyethylen

Ultrahochmolekulare Polyethylenfasern sind von der grundlegenden Chemie her Polyethylenwerkstoffe, welche sich durch sehr hohe Molekülmassen und daraus resultierende, sehr lange Molekülketten von den Standard-Polyethylenen abgrenzen [Bön86]. Bei neueren Fasertypen wird dazu übergegangen, Co-Polymere herzustellen. Dazu werden neben den Ethen-Monomeren zusätzlich 1-Propenmonomere in sehr geringem Anteil beigemischt, sodass die eigentlich linearen Makromoleküle des Polyethylen kurze Seitenketten erhalten. So lassen sich thermische und mechanische Eigenschaften der Fasern gezielt manipulieren und einstellen [Hea01] [Pat02].

Prinzipiell werden drei grundlegende Varianten zur Erzeugung bzw. Herstellung hochfester Fasern aus UHMW-Polyethylen unterschieden (nach [Bön86]):

- Verarbeitung im festen Aggregatzustand
- Verarbeitung der Polymerschmelze
- Verarbeitung von Polymerlösungen

2.5.1 Faserherstellung im festen Aggregatzustand

Düsenziehverfahren

Beim Düsenziehverfahren werden Polymerstäbe oder -körper im Festzustand durch eine beheizte Düse gezogen und kalt verstreckt. Durch die Scherkräfte in der Düse, die sich mit dem Einwirken thermischer Energie und den angelegten Zugspannungen überlagern, wird eine Orientierung der Moleküle entlang der Stabachse in den Polymerstäben ermöglicht. Neben der mittleren Molekülmasse sind die Verarbeitungstemperatur und der Reckgrad die beiden Prozessgrößen, die die Festigkeit der entstehenden Fasern maßgeblich beeinflussen [Bön86]).

Direktextrusion

Das Extrudieren erfolgt mittels eines Kolbenextruders durch Spinndüsen, weshalb das Verfahren auch als Kolbenextrusion (engl. ram extrusion) bezeichnet wird. Die Fasern werden direkt nach der Extrusion kalt verstreckt. Neben der Molekülmasse der Polymere haben verschiedene Prozessgrößen (Düsengeometrie, Extrusionsgeschwindigkeit und -temperatur sowie die Kristallisationsbedingungen) Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der entstehenden Fasern [Bön86].

Hydrostatische Extrusion

Das Grundverfahren ähnelt der Direktextrusion, jedoch befindet sich der Extrusionswerkstoff in einer gedichteten Kammer und ist vollständig von Öl umgeben. Die Einleitung des Extrusionsdrucks erfolgt in das Öl und wird von dort an das Extrusionsgut weitergeleitet. So werden Reibungseffekte zwischen Extrusionsgut und Kolbenwand verringert. Die beeinflussenden Prozessgrößen sind identisch mit denen beim Verfahren der Direktextrusion [Bön86].

Koextrusion

Schmelz- oder lösungskristallisiertes Polyethylen wird in einem 2-stufigen Extrusionsprozess zu einer Faser extrudiert. Die Faser wird direkt im Anschluss verstreckt. Die Kristallisationsbedingungen, die Extrusionsgeschwindigkeit und die Molmasse bilden relevante Einflussgrößen [Bön86].

Zonenstreckverfahren

Bei diesem Verfahren wird schmelzgesponnenes Material „veredelt“ (Zitat aus [Bön86], Seite 13), indem die Proben mit konstanter Kraft beaufschlagt werden. Mittels Ring- oder Bandheizern, die mit einer gleichmäßigen Geschwindigkeit an den Fasern entlang geführt werden, werden die Proben aufgeheizt und verstreckt. Eine Aneinanderreihung mehrerer Verstreckzyklen mit zwischengelagerten Temperstufen verbessert die Ergebnisse erheblich. Als Einflussgrößen sind die Molmasse der Fasern, die Temperaturen der Heizelemente, die Bewegungsgeschwindigkeit der Heizelemente und die Höhe der Kraft beim Verstrecken zu werten [Bön86].

Rollenstreckverfahren

Bei diesem Verfahren werden vorgeheizte Polyethylen-Filme mittels „beheizter Walzen kalandriert und abgezogen“ (Zitat aus [Bön86], Seite 13). Die Molmasse ist eine der wichtigsten Einflussgrößen [Bön86].

2.5.2 Faserherstellung aus der Polymerschmelze

Schmelzspinnverfahren

Schmelzspinnverfahren sind zur Herstellung aller Fasern aus thermoplastischen Kunststoffen und thermoplastischen Elastomerwerkstoffen geeignet, auch für niedermolekulare Fasern. Das Grundprinzip ist dabei bei allen Fasern identisch. Der Kunststoff wird geschmolzen, durch einen Düsenstock gepresst und erkaltet unmittelbar nach dem Austritt aus der Düse. Durch die Scherung in den Düsen orientieren sich die Moleküle entlang der Faserachse. Bei ultrahochmolekularen Fasern ist meist eine Verstreckeinrichtung nachgeschaltet, um die Festigkeit der Fasern weiter zu erhöhen [Bön86], [Hea01], [Hei13].

2.5.3 Faserherstellung über Polymerlösungen

Surface Growth

Dieses von Pennings und Zwijnenburg im Jahr 1976 vorgestellte Verfahren beschreibt die Bildung von Fasern aus einer strömenden p-Xylol-Lösung. Die unterkühlte Lösung wird zwischen zwei konzentrisch angeordnete Zylinder gebracht, wobei der innere rotiert und somit in der Lösung einen Strömungszustand ausbildet. Durch die Strömung wird in der Lösung ein Kristallwachstum initiiert. Über eine dünne Teflon-Leitung, welche senkrecht zur Rotationsachse der konzentrischen Zylinder angebracht ist, wird ein Filament unter konstanter Vorspannung abgezogen, wodurch es zu einer Orientierung der Kristallite im Filament kommt. Im Anschluss ist ein Verstreckprozess mit Einwirkung thermischer Energie nachgeschaltet [Zwi76].

Mit diesem Verfahren konnten erstmals Festigkeiten und Zugmoduln erreicht werden, die den Werten der heutigen UHMW Polyethylenfasern entsprechen [Bön86]).

Suspensions- bzw. Lösungsspinnen

Das Suspensions- bzw. Lösungsspinnen beschreibt ein Verfahren, bei dem eine Suspension oder Lösung aus UHMW Polyethylen und einem entsprechenden Dispergiermittel (z.B. Paraffinöl) bzw. Lösungsmittel (z.B. Decan, Decahydronaphthalin) durch einen Düsenstock versponnen wird. Im Anschluss wird das Lösungsmittel bzw. Dispergiermittel ausgetragen und die Faser einem thermischen Verstreckprozess unterzogen (vgl. [Bön86]).

Eine Sonderform des Suspensions- bzw. Lösungsspinnens ist das Gelspinnen. Dabei wird das Polymer aus einer Decan- oder Decahydronaphthalinlösung versponnen. Das Lösungsmittel wird bei diesem Verfahren jedoch nach dem Spinnen nicht vollständig ausgetragen, sondern nur partiell, sodass die Faser in einem gelartigen Zustand verbleibt. Diese gelartigen Fäden werden in einem Ofen unter Wärmeeinwirkung verstreckt [Bön86], wobei das im Gel verbliebene Lösungsmittel gleichzeitig verdampft wird.

2.5.4 Relevante Verfahren

Aus den in Kapitel 2.3.2 bis Kapitel 2.3.4 gezeigten Verfahren haben sich die Verfahren zur Herstellung der Fasern aus Lösungen/Suspensionen bzw. das Gelspinnverfahren weitestgehend durchgesetzt [Bön86] [Hea01], da mit diesen Verfahren gute Werte für E-Modul und Festigkeit erreicht werden können [Bön86]. Tabelle 3 zeigt mögliche Werte für E-Modul und Festigkeit der Fasern, wie sie in fachbezogenen Literaturquellen für die gezeigten Herstellungsverfahren beispielhaft genannt werden.

Tabelle 3: Eigenschaften von UHMW-PE-Fasern diverser Herstellungsverfahren

Herstellungsverfahren	Mittl. Molmasse \bar{M}_w [10^6 g/mol]	E-Modul E [GPa]	Bruchspannung σ_B [N/mm ²]	Reckgrad R_F [-]
Direktextusion	0,05 – 0,06	60	500	35
Koextrusionsverfahren	2,0	222	2000	250
Rollenstreckverfahren	0,061	43	670	25
Surface-Growth	> 1	119	4700	5
Suspensionsspinnen	> 1	124	3800	100
Gelspinnverfahren	> 1	90	3000	32

(nach [Bön86])

Es ist ersichtlich, dass mit dem Koextrusionsverfahren deutlich höhere E-Moduln und Festigkeiten als mit dem Gelspinnverfahren, mit dem Surface-Growth-Verfahren vergleichbare Werte wie beim Gelspinnen erzielt werden können. Beim Koextrusionsverfahren muss das ultrahochmolekulare Polyethylen jedoch unter speziellen Bedingungen aus einer Lösung oder Schmelze auskristallisiert und dann in einem zweistufigen Extrusionsprozess verarbeitet werden. Beim Surface-Growth-Verfahren ist ein sehr komplizierter Aufbau mit einer sehr sensiblen Kraftregelung nötig. Diese Verfahren haben sich in der kommerziellen Herstellung der Fasern wegen des hohen Herstellungsaufwandes nicht durchsetzen können.

Aus Tabelle 3 ist weiterhin ersichtlich, dass die Verarbeitung der ultrahochmolekularen Polyethylene einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften (Festigkeit; E-Moduln) der Fasern hat (vgl. auch [Bön86], [Hea01]).

2.5.5 Allgemeine Eigenschaften der Fasern

Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln erwähnt, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der vergleichenden Untersuchung von verschiedenen, am Markt verfügbaren UHMW Polyethylenfasern. Als ultrahochmolekulare Polyethylenfasern werden nach [Bön86] Polyethylenfasern mit einer mittleren molaren Masse von $\bar{M}_w \geq 10^6 \text{ g/mol}^3$ definiert. Am Markt werden solche Fasern auch als HMPE (high-modulus polyethylene, deutsch: hochmoduliges Polyethylen) vertrieben. Diese Bezeichnung ist jedoch nicht eindeutig. Folgt man beispielsweise der Definition nach Wolbring (vgl. [Wol83]), so werden als hochmodulige, polymere Materialien diejenigen bezeichnet, deren realer E-Modul mindestens $E = 0,15 E_c$ beträgt, wobei E_c den E-Modul eines Polymer-Einkristalls bezeichnet. In der Literatur finden sich Werte für Polyethylen von $240 \text{ GPa} \leq E_c \leq 312 \text{ GPa}$ (vgl. [Bön86], [Kan83]), was bedeutet, dass alle Polyethylenwerkstoffe mit $E \geq 36 \text{ GPa}$ als hochmoduliges Polyethylen gelten. Alle in Tabelle 3 dargestellten Fasern erreichen diese Werte, obwohl nicht alle aus ultrahochmolekularem Polyethylen hergestellt worden sind (vgl. Werte der mittleren Molmasse in Tabelle 3). Für die weitere Arbeit wird die Bezeichnung ultrahochmolekulares Polyethylen (UHMW Polyethylen) verwendet.

Der Markt für ultrahochmolekulare Polyethylenfasern unterliegt einer ständigen Wandlung. Es verschwinden Hersteller und Markennamen vom Markt, während fortlaufend neue Fasern verschiedener Hersteller, vorrangig aus dem asiatischen Raum, auf den Markt gelangen (vgl. Tab. 4). Wegen der unterschiedlichen Herstellung der Fasern (jeder Hersteller verweist im Regelfall auf ein eigenes Herstellungspatent) zeigen die Fasern teilweise unterschiedliche Eigenschaften.

Die in Tabelle 4 gezeigte Übersicht zu am Markt bekannten Fasern aus UHMW Polyethylen und deren Herstellern dient lediglich der Verdeutlichung der Vielfalt, da sie wegen der ständigen Wandlung des Marktes nicht als vollständig betrachtet werden kann.

³ mol: Ist die Basis-SI-Einheit der Stoffmenge n , welche indirekt die Teilchenanzahl N (bei Polymeren die Anzahl an Molekülen) in einer 'Portion' eines Werkstoffes bezeichnet. Nach Avogadro gilt: $N_A = 6,02214129 \cdot 10^{23}/\text{mol}$ (vgl. [Bet98]).

Tabelle 4: Handelsnamen von UHMW-Polyethylen-Fasern im Überblick

Hersteller	Handelsname(n)	Ursprungsland	Bemerkungen
Schleicher&Schuell GmbH	Certran®	Deutschland	Seit 2004 Whatman plc (Großbritannien); Faser nicht mehr am Markt
BAE Systems – Tensylon High Performance Materials	Tensylon®	England	BAE gehört heute zu DuPont; Faser nicht mehr am Markt
DSM Dyneema B.V.	Dyneema®	Niederlande	diverse Typen (SK65, SK75, SK78, DM20)
Honeywell International Inc.	Spectra®	USA	diverse Typen (S900, S1000, S2000)
(unbekannt)	TNX®	China	
Beijing Tongyizhong Specialty Fibre and Development Co. Ltd.	TM (EOSTEN®)	China	diverse Typen (TM27, TM30, TM32; TM35); Vertrieb in Europa über EOS 3 s.r.l. (Italien) als Marke EOSTEN®
Shandong ICD High Performance Fibers Co. Ltd	Trevo®	China	ICD seit 2011 im Besitz von DSM Dyneema N.V.; diverse Typen (Trevo®50, Trevo®60, Trevo®70); Vertrieb über Fibrexe LLC (Isle of Man)
Ningbo Dacheng Advanced Material Co. Ltd	DC	China	diverse Typen (DC-80, DC-85, DC-88)
Dong Yang Jae Kang Co., Ltd. (Dong Yang Ropes)	MirAcle®	Korea	diverse Typen (Minu α, Minu β, Minu γ, Minu δ)

Die Festigkeit von Fasern aus hochmolekularem Polyethylen ist im Allgemeinen mit der von Stahl vergleichbar oder höher, der E-Modul ist jedoch mit Werten von $100 \text{ GPa} \leq E_{PE} \leq 140 \text{ GPa}$ [Bön86] [Dyn07] [Hea01] niedriger als bei Stahl ($E_{Fe} \approx 210 \text{ GPa}$). Die Dehnung bei Bruch beträgt ca. $3\% \leq \epsilon_{bPE} \leq 4\%$ [Hea01] [Dyn07], und liegt damit am oberen Rand der Werte von Stahldraht für Drahtseile ($1,9\% \leq \epsilon_{bFe} \leq 4\%$; vgl. [Fey00]). UHMW-Polyethylene sind, genau wie Standard-Polyethylene, resistent gegen viele Lösungsmittel und nahezu alle Säuren und Basen. Sie sind nicht anfällig für elektrochemische Korrosion, weisen eine moderate Beständigkeit gegen UV-Strahlung auf [Gup05] [Mam12] [MaR12] [Zha03], nehmen kein Wasser auf und sind aufgrund ihrer niedrigen Dichte, meist ca. $0,97 \text{ g/cm}^3$ bis $0,99 \text{ g/cm}^3$, schwimmfähig [Dom05] [Hea01] [Dyn07]. Vor allem die niedrige Dichte, kombiniert mit der hohen Festigkeit und die UV-Beständigkeit unter realem Tageslicht unterscheidet die Fasern aus UHMW-Polyethylen von anderen am Markt verfügbaren, hochfesten Polymerfasern. In Tabelle 5 sind einige Eigenschaften hochfester Polymerfasern im Vergleich dargestellt.

Tabelle 5: Übersicht über Eigenschaften ausgewählter hochfester Fasern

Handelsname der Faser	Zugfestigkeit [N/mm ²]	Bruch- dehnung [%]	Dichte [g/cm ³]	Max. Einsatz- temperatur [°C]	Kriechrate [% p.a.]
Dyneema® (UHMW Polyethylen)	3300 – 3900	3 – 4	0,97 – 0,98	≈ 60	2 - 7
Vectran® (aromatisches Polyester)	3200	3,3 – 3,7	1,4	≈ 100 - 150	0,15 – 0,17
Twaron® (Aramid)	2820 – 3250	2,9 – 3,7	1,44 – 1,45	≈ 200	≈ 0,1
Technora® (Aramid- Copolymer)	3300 - 3460	3,8 – 4,8	1,39	≈ 200	≈ 0,1
Zylon® (PBO)	≈ 5800	2,5	1,56	≥ 400	≈ 0,001

Quellen: [Dyn07], [Dyn08], [Tec09], [Twa09], [Vec12], [Zyl05]

Ein gravierender Nachteil von UHMWPE-Fasern ist die hohe Neigung zu Relaxations- bzw. Retardationsvorgängen [Dav11] [Dom05] [Cos95] [Jac99], welche bei Fasern aus UHMW-Polyethylen deutlich höher als bei anderen hochfesten Polymerfasern ist (vgl. Tabelle 5). Dabei bezeichnet die Spannungsrelaxation den Spannungsabbau unter konstanter Dehnung, die Retardation das last-, zeit- und temperaturabhängige, stetige Ansteigen der Verformung der Fasern unter konstanter Spannung [Bar00] [Dom05], was auch als Kriechen (engl.: creep) bezeichnet wird [Hea01] [Hei13].

Bedingt durch das visko-elastisch geprägte, zeitabhängige Werkstoffverhalten der Fasern aus UHMW-PE (vgl. z.B. [Hei13], [McK04]) sind exakte Angaben über die Kriechrate nur mit hohem zeitlichen Aufwand möglich, da alle Vorgänge zeitabhängig ablaufen, und nach Entlastung der Probe erst nach unendlich langer Zeit alle reversiblen Vorgänge vollständig abgeschlossen sind. Bei der Ermittlung der Kriechrate wird im Regelfall direkt nach Ende der Belastung die Verformung bestimmt (siehe [DIN03] und [DIN99]), wodurch langsam ablaufende, reversible Vorgänge nicht vollständig ablaufen können, was die Ergebnisse leicht verfälscht.

Ein weiterer Nachteil sind die auf etwa 60°C beschränkten Einsatztemperaturen [Eid13] [Hei13] [Mam12], die einen Einsatz in temperaturkritischen Bereichen oder Umgebungen mit aus Sonneneinstrahlung resultierender, starker Erwärmung erschweren.

2.6 Bewertung des Standes der Technik

Wie in Kapitel 2.5 bereits gezeigt, hat die Molmasse von Polymeren Einfluss auf die Kristallinität und damit auf die Festigkeit von teilkristallinen Polymeren im Allgemeinen. Bei der Faserherstellung von UHMW Polyethylen-Fasern aus Lösungen werden die teilkristallinen Strukturen aufgelöst und es kommt zur Bildung von globularen Strukturen, wobei der Radius der Strukturen, welcher Gyrationradius R_G genannt wird [Bön86], von der Molmasse und der Konzentration des Polymers in der Lösung abhängig ist. Synthetische Polymere, was UHMW Polyethylen einschließt, bestehen jedoch nie vollständig aus Molekülen mit der gleichen Kettenlänge, sondern sind immer eine Mischung aus Molekülketten unterschiedlicher Kettenlänge und damit unterschiedlicher Molmasse [Det67] [Eli80].

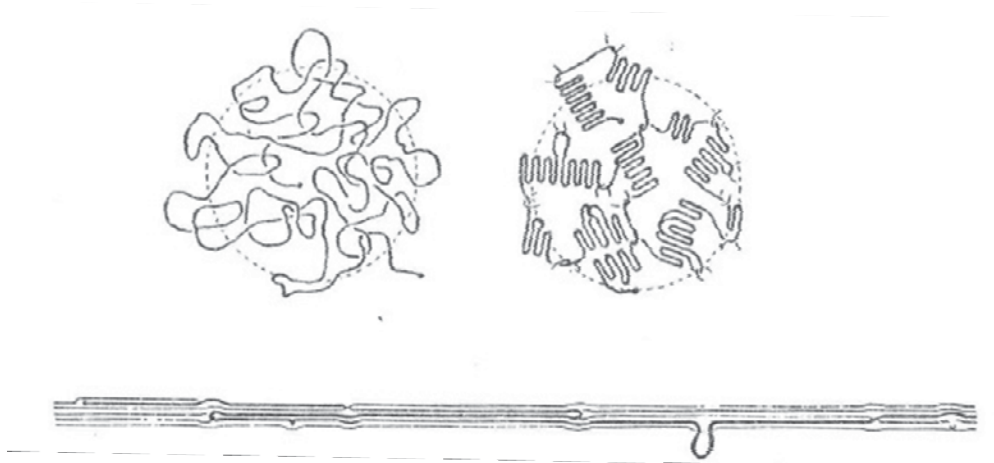


Abbildung 14: Globulare Molekülstrukturen in Polymerlösungen (oben) und Molekülstruktur nach dem Verstrecken von Polymerfasern (unten); Quelle: [Bön86]

Durch das Verspinnen der UHMW Polyethylene zu Fasern werden die Molekülketten vorrangig entlang der Faserachse orientiert (vgl. [Bön86] und Abb. 14), wobei es zur Bildung von Kristalldefekten und Molekülüberfaltungen (z.B. durch verbleibende Verschlingungen zwischen Molekülen) kommen kann [Bön86] [Hea01].

Bedenkt man nun die im vorherigen Absatz beschriebene Tatsache, dass UHMW Polyethylen in Lösungen globulare Strukturen ausbildet, und dass der Gyrationradius dieser Strukturen unter anderem von der Molmasse abhängig ist, so müssten die in der Spinndüse entstehenden Scherkräfte auf unterschiedlich große Globuli unterschiedliche Auswirkungen haben, was in Unterschieden der Fasermorphologie resultieren müsste. Weiterhin hat der Gyrationradius einen Einfluss auf den maximal möglichen Reckgrad bei der anschließenden Verstreckung der Fasern [Bön86]. Vor dem Hintergrund, dass für die Verstreckung einer bestimmten Faser ein fester Reckgrad zu Grunde liegt, wird sich eine Abweichung des gewählten Reckgrades vom maximal möglichen Reckgrad in unterschiedlich verstreckten Bereichen zeigen.

Berücksichtigt man die bereits oben genannte Tatsache, dass die Ausprägung der Fasermorphologie einen großen Einfluss auf die Festigkeit hat, müssen unterschiedliche Molmassen der einzelnen Moleküle in der Lösung zwangsläufig zu lokal begrenzten Unterschieden in der Festigkeit der Fasern führen. Bei einer Bestimmung der Zugfestigkeit von Fasern aus UHMW Polyethylen müsste sich also eine breitere Verteilung der Molmasse (höhere Anzahl an verschiedenen Molmassen der Einzelmoleküle) in einer größeren Varianz der Messwerte um das Mittel bemerkbar

machen, während eine engere Verteilung der Molmasse (geringe Anzahl unterschiedlicher Molmassen der Einzelmoleküle in der Lösung) eine kleinere Varianz der Messwerte um das Mittel zeigen müsste. Eine erste, in der Arbeit weiter zu verfolgende These lässt sich daher wie folgt formulieren:

Kennt man von einer Faser 1 aus UHMW Polyethylen die Verteilung der Molmasse und die Varianz der Werte bei der Bestimmung der Zugfestigkeit, so kann aus den Werten der Verteilung der Molmasse einer Faser 2 aus UHMW Polyethylen die zu erwartende Varianz der Messwerte bei der Bestimmung der Festigkeit der Faser 2 quantitativ abgeschätzt werden.

Wie in Abbildung 14 gezeigt und in [Bön86] detailliert beschrieben, bildet sich in den Fasern aus UHMW Polyethylen durch das Verspinnen und anschließende Verstrecken eine orientierte, kristallartige Morphologie aus.

Aus der Literatur sind Werte für die Schmelzenthalpie von Polyethylenekristallen, also zu 100% kristallinen Polyethylenstrukturen, bekannt [Sch01]. Es ist weiterhin in der Literatur beschrieben, dass man aus der Schmelzenthalpie eines teilkristallinen Polymers auf seine Kristallinität schließen kann [Sch01]. Da die Schmelzenthalpie von Fasern aus UHMW Polyethylen z.B. über die dynamische Differenzkalorimetrie ermittelt werden kann, und bekannt ist, dass die Kristallinität von teilkristallinen Polymeren Einfluss auf deren Festigkeit in so weit hat, dass mit steigender Kristallinität die Festigkeit steigt, lässt sich folgende zweite, weiter zu verfolgende These formulieren:

Kennt man von einer Faser 1 aus UHMW Polyethylen die Schmelzenthalpie ΔH_f und die Zugfestigkeit R_m , so kann man aus den Werten der Schmelzenthalpie einer Faser 2 aus UHMW Polyethylen die zu erwartende Festigkeit mit ausreichender Genauigkeit berechnen.

Zur Überprüfung der beiden gestellten Thesen sind, neben den mechanischen Prüfungen zur Festigkeit der Garne, Analysen zur Bestimmung der Molmasseverteilung und zur Ermittlung der Schmelzenthalpie ein wichtiger Bestandteil der im Folgenden beschriebenen Versuche.

3 Versuchsdurchführung

Eine anwendungsnahe Prüfung von Seilen ist der Ausgangspunkt für eine Abschätzung der Eignung von Faserseilen für den Einsatz in fördertechnischen Anwendungen [Hei11] [Hei13]. Um die gewählten UHMW-Polyethylen-Fasern, bzw. die daraus gefertigten Seile, im qualitativen und quantitativen Vergleich untersuchen zu können, werden zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von Fasern und daraus gefertigten Seilen die im Folgenden aufgeführten Prüfmethoden herangezogen. Hier sollen lediglich die Versuche genannt, die Fakten bzw. Daten die zur Entscheidungsfindung beitrugen erläutert, sowie die Relevanz der Versuche für die gesamten Untersuchungen aufgezeigt werden. Eine detaillierte Beschreibung der Versuchsaufbauten, eventuell vorhandener, gültiger Normen sowie der Versuchsparameter und ein Versuchsplan folgen im Anschluss.

3.1 Probenbeschreibung

Wie bereits in vorangegangenen Kapiteln erwähnt, sollen im Rahmen dieser Arbeit geflochtene Faserseile aus einer Auswahl an ultrahochmolekularen Polyethylenfasern, unter Berücksichtigung des Kostenfaktors, qualitativ und quantitativ bezüglich ausgewählter mechanischer Eigenschaften verglichen werden.

In Kapitel 2.5.5 (Tabelle 4) wurde bereits eine Anzahl am Markt bekannter Fasern aus ultrahochmolekularem Polyethylen gezeigt. Aus den dort genannten Fasern wurden einige Typen ausgewählt, die entsprechend den Datenblättern der Hersteller bzw. Lieferanten über vergleichbare mechanische Eigenschaften verfügen sollen:

- Dyneema® SK75 in 1760 dtex
- Spectra® S1000 in 1778 dtex
- TNX® in 1780 dtex
- Eoston® FT093 in 1760 dtex

Die Einheit dtex bezeichnet den Garntiter T_t (auch Garnfeinheit) und damit das längenspezifische Gewicht der Garne ($1 \text{ dtex} = 1 \text{ g}/10000 \text{ m}$). Der Garntiter war ein weiteres Kriterium für die Auswahl, da die Feinheit des Garnes bei identischer Fertigung der Seile einen Einfluss auf den effektiv tragenden Querschnitt der Seile hat.

3.1.1 Allgemeine Eigenschaften der ausgewählten Garne

Die ausgewählten und im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fasern sind ausschließlich durch Gelspinnverfahren oder Suspensionsspinnverfahren hergestellt, welche in Kapitel 2.5.3 bereits grob beschrieben wurden. In Tabelle 6 sind einige Eigenschaften der zu untersuchenden Fasertypen, welche aus den Datenblättern entnommen wurden, aufgezeigt.

Tabelle 6: Ausgewählte Eigenschaften von UHMW Polyethylenfasern

Werkstoff	Dyneema® SK 75	Spectra® S1000	TNX®	Eoston® FT093
Zugfestigkeit	3400 N/mm ²	3040 N/mm ²	33 cN/dtex ⁴ (≈3250 N/mm ²)	2700 N/mm ²
Dehnung bei Bruch	3,5 %	3,5 %	3,04 %	< 3%
Dichte	0,975 g/cm ³	0.97 g/cm ³	keine Angabe	0.97 g/cm ³
Garntiter	1760 dtex	1778 dtex	1780 dtex	1760 dtex
Preis	45,00 €/kg	ca. 50,00 €/kg	30,00 €/kg	22,50 €/kg
Patente	EP1193335 WO99/63137	WO2006/124054 US7344668	keine Angabe	EP1694888B1 WO2005/066397

Wie in den Daten ersichtlich ist, zeigen die Garne geringfügige Unterschiede in den Werten von Garntiter, Dichte, Zugfestigkeit und Preis. Jede der gewählten Fasern wird nach einem eigenen Patent hergestellt, welches im Grundprinzip einen Lösungs- oder Gelspinnprozess beschreibt [Pat02] [Pat05] [Pat08].

Wie in Tabelle 4 (Kap. 2.5.5) und Tabelle 6 ersichtlich ist, liegen zum Fasertyp TNX® nur wenige Daten vor. Obwohl die Faser kommerziell vertrieben wird und es in Europa einen Händler gibt, stellt der in China ansässige Generalvertrieb nur wenige Daten zur Faser zur Verfügung.

⁴ Die Abschätzung des Wertes der Zugfestigkeit in N/mm² erfolgte unter der Annahme, dass die Dichte des Werkstoffs TNX® ca. 0,975 g/cm³ beträgt.

Die Unterschiede zwischen den Herstellungspatenten liegen hauptsächlich in der Zusammensetzung der Polymerlösungen, aus denen die Spinnlösungen zusammengestellt werden. Zur Herstellung einiger Fasern konnten die in Tabelle 6 genannten Patente als Herstellungspatente ermittelt werden. Bei der Prüfung der Patente wurden einige Unterschiede in den Herstellungsverfahren erkannt, welche im Folgenden kurz dargestellt werden.

Die Faser Dyneema® SK75, gefertigt nach dem Europa-Patent EP1193335A1, dem das Weltpatent WO99/63137 zugrunde liegt, wird aus einer Mischung mehrerer Polymere hergestellt und ist somit kein reines Polyethylen, sondern ein dotierter Polyolefinwerkstoff. Es wird eine Lösung A, welche aus Polyethylen hoher Molmasse und enger Molmasseverteilung besteht, mit einer Lösung B gemischt, welche aus mit 1-Propylen und 1-Buten dotierten Polyethylenmolekülen besteht [Pat02]. Als Lösungsmittel wird Decahydronaphthalin (Trivialname: Dekalin) verwendet. Detaillierte Angaben zur Molmasseverteilung und zu den bei der Verstreckung der Fasern zur Anwendung kommenden Reckgraden finden sich im Patent nicht, jedoch wird erwähnt, dass im Anschluss an den Prozess des Faserspinnens ein thermisch beeinflusster, mehrstufiger Verstreckprozess erfolgt [Pat02].

Der Herstellungsprozess für die Faser Spectra® S1000, die nach dem Weltpatent WO2006/124054 hergestellt wird, basiert auf einer Lizenz, welche 1999 von DSM Dyneema (Niederlande) an Toyobo (Japan) und Honeywell (USA) vergeben wurde. Das Weltpatent WO2006/124054 beschreibt nun eine Weiterentwicklung des Verfahrens durch Honeywell International. Im Patent werden Werte für die intrinsische Viskosität⁵ von 5 dl/g und 45 dl/g genannt, was auf Molmassen im Bereich von $3,8 \cdot 10^5 \text{ g/mol} \leq M \leq 8,7 \cdot 10^6 \text{ g/mol}$ (vgl. [Vas02], S.359 fff) schließen lässt. Ein weiterer Schutzanspruch im Patent WO2006/124054 ist, dass weniger als 2 Seitenketten pro 1000 Kohlenstoffatome vorhanden sein dürfen, was darauf schließen lässt, dass diese Faser ebenfalls aus einem dotierten Polyethylen hergestellt wird. Für den an den Spinnprozess angeschlossenen Verstreckprozess werden Temperaturen zwischen 130°C und 160°C genannt. Die Nennung von Zonenöfen lässt auf einen Verstreckprozess mit mehrstufiger Temperung schließen [Pat05].

⁵ Die intrinsische Viskosität, auch Grenzviskosität oder Staudinger-Index, bezeichnet den Viskositätsgrenzwert einer unendlich stark verdünnten Lösung (siehe auch [Vas02]).

Auf dem Datenblatt für den Werkstoff Eosten FT093 ist das Patent EP1694888B1 als Herstellungspatent aufgeführt. Eine Recherche zum Patent ergab, dass Inhaber dieses Patent eine chinesische Investment- und Entwicklungsgesellschaft ist. Die Firma Beijing Tongyizhong Specialty Fibre and Development Co. Ltd. in China, welche selbst Fasern aus UHMW Polyethylen herstellt und vermarktet (vgl. Tab. 4), gibt gleichfalls dieses Herstellungspatent als Grundlage zur Faserherstellung an. Das Patent EP1694888B1 beschreibt die Herstellung der Spinnlösung aus zwei Lösungsstufen, welche als Lösungsmittel gesättigte, aromatische und aliphatische Paraffinöle als Lösungsmittel enthält. Es werden eine Lösung A mit Polymergehalten zwischen 12% und 60% und eine Lösung B mit Polymergehalten zwischen 25% und 60% gemischt und über einen Doppelschneckenextruder versponnen [Pat08]. Der Austrag der Paraffinöle nach dem Spinnprozess erfolgt über Waschen in einer Extraktionslösung aus Dichlormethan und Xylenen, unter Beschallung mit Ultraschallwellen. Die Fasern werden mit Reckgraden von $2 \leq R_F \leq 6$ vorgestreckt und anschließend mehrstufig bei 100°C bis 120°C zu Gesamtreckgraden von $R_F = 180$ verstreckt. Als Ausgangsstoff ist Polyethylen-Granulat mit Molmassen von $1 \cdot 10^6 \leq M \leq 7 \cdot 10^6$ g/mol genannt [Pat08].

Für den Fasertyp TNX[®] sind keine Daten zur Herstellung veröffentlicht.

Das Fehlen von Vorgaben für den Reckgrad und die Molmasse in einigen der Herstellungspatente macht es unmöglich, aus den Herstellungspatenten auf zu erwartende Unterschiede zwischen den Fasern zu schließen, da diese beiden Faktoren einen erheblichen Einfluss auf die Kristallinität und Orientierung, und damit auf Festigkeit, Dehnung und Kriechverhalten, der einzelnen Fasern haben (vgl. Kap. 2.3 und [Bön86]).

3.1.2 Seilparameter

Aus den ausgewählten Fasern wurden geflochtene Seile mit identischen Flechtparametern gefertigt. Es wurden je 7 Garne mit 25,8 Drehungen pro Meter (Vorgabewert) zu einer Litze gezwirnt, davon 6 in S-Richtung und 6 in Z-Richtung. Aus diesen Litzen wurden 12-litzige Faserseile mit einer Flechtlänge von 39 mm (Vorgabewert) in einer 2-flechtigen Bindung geflochten. Das bedeutet bei einem geflochtenen Seil, dass die erste Litze über die zweite und dritte Litze und unter die vierte und fünfte Litze läuft, die zweite Litze über die dritte und vierte und unter der fünften und sechsten Litze, usw. (vgl. Abb. 15).

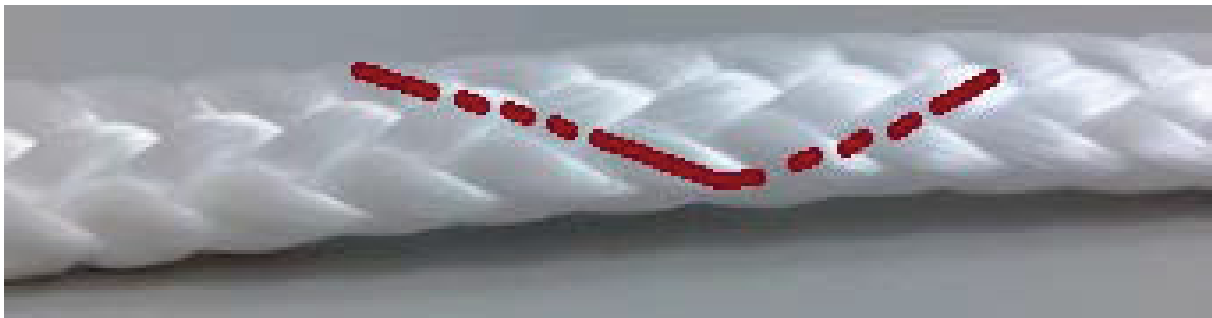


Abbildung 15: Seilmuster aus Spectra® S1000 in 2-flechtiger Bindung mit Verlauf eine Litze

3.2 Versuchsprogramm

Die im Folgenden aufgezeigten Untersuchungen beginnen mit vergleichenden Untersuchungen an Garnen und Seilen, hinsichtlich ihrer Festigkeit. Die Zugversuche an Garnen werden in Anlehnung an DIN EN ISO 2062 (vgl. [DIN10]) durchgeführt. Die Zugversuche an Seilen erfolgen nach DIN EN ISO 2307. Diese Norm ist für Faserseile im Allgemeinen gültig und weder hinsichtlich der Machart noch hinsichtlich der Seilwerkstoffe eingeschränkt (vgl. [DIN11]). Die Bestimmung der Bruchkraft wird durchgeführt um sicherzustellen, dass die Bruchkraft aller im Weiteren untersuchten Seile in einem vergleichbaren Bereich liegt.

Über die Bestimmung der Dichte nach ASTM D 3800, welche an den Garnen durchgeführt wird, sowie über die Bestimmung der Seilfeinheit (lineare Masse) können die im Zugversuch an Garnen bzw. Seilen ermittelten Werte der Höchstzugkraft der Garne bzw. der Seilbruchkraft in Zugfestigkeiten bzw. Bruchspannungen umgerechnet werden.

Die Bestimmung der Verteilung der Molmasse M soll dazu beitragen, eventuell vorhandene Unterschiede zwischen den Werkstoffen, hinsichtlich der statistischen Verteilung der Messwerte der Bruchkraft, auf die Ausgangswerkstoffe zurückführen zu können, was zur Verifizierung der in Kapitel 2.6 gestellten, ersten These dienen soll. Eine differenzkalorimetrische Untersuchung (DSC) wird zur Abschätzung der Kristallinität der Fasern und der Prüfung der in Kapitel 2.6 genannten, zweiten These herangezogen.

Garnabrasionsversuche sollen Aufschluss über das zu erwartende Verhalten im Dauerbiegeversuch geben, da die im Garnabrasionsversuch geprüfte Faser-Faser-Reibung in ähnlicher Ausprägung bei laufenden Seilen auftritt, und dort die Lebensdauer maßgeblich beeinflusst.

In vielen fördertechnischen Anwendungen (z.B. Kräne, Aufzüge, windenbasierte Anwendungen, Treibscheibenanwendungen) ist das Verhalten der Seile unter Dauerbiegung ein entscheidendes Kriterium für eine anwendungsgerechte Dimensionierung. Daher sind Dauerbiegeversuche in Anlehnung an VDI2358 unter Variation verschiedener Parameter durchzuführen. Als zu variierende Parameter wurden folgende ausgewählt:

- Zugspannung im Seil
- Biegelänge (Länge der Biegezone)
- Umlaufgeschwindigkeit des Seiles

Da das Thermofixieren, wie bereits in Abschnitt 2.3.4 erläutert, ein wesentlicher Bestandteil der modernen Seilherstellung ist, sind Thermofixierversuche ein weiterer Bestandteil der Arbeit. Dabei soll untersucht werden, ob die am Institut in früheren Untersuchungen (vgl. [HeM11]) als optimal ermittelten Thermofixierparameter für den Werkstoff Dyneema® Sk75 bei den anderen ausgewählten Fasern aus UHMW Polyethylen zu vergleichbaren Festigkeitssteigerungen führen. Weiterhin muss untersucht werden, ob sich bei den verschiedenen Werkstoffen eventuell Unterschiede in der optimalen Verarbeitungstemperatur zeigen.

In früheren Untersuchungen wurde gezeigt, dass Faserseile nach dem Thermofixieren einen geringeren Nenndurchmesser aufweisen (vgl. z.B. [Hei13], [HeM11]). Daher soll die Feinheit (lineare Masse) der Seile nach dem Thermofixieren entsprechend erneut nach den Vorgaben in DIN EN ISO 2307 bestimmt werden, um die Festigkeitssteigerungen in Form der Zugfestigkeit vergleichen zu können.

Um Veränderungen in der primären und sekundären Molekularstruktur der polymeren Faserwerkstoffe (z.B. Dichteveränderungen, Änderungen der Orientierung) erkennen zu können, sollen nach dem Thermofixieren ebenfalls erneut Dichtemessungen durchgeführt werden. Die Dichtemessungen dienen weiterhin zu einer Umrechnung der Bruchkräfte in Bruchspannungen, um einen besseren Vergleich mit nicht thermofixierten Seilen im Lieferzustand zu gewährleisten.

3.3 Versuchsaufbauten, Normen und Parameter

Im Folgenden werden die Prüfabläufe und die zugehörigen Prüfaufbauten zu den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuchen erläutert. Gegebenenfalls vorhandene Normen und darin enthaltene Vorgaben und bei den Versuchen eventuell von den Normen abweichende Prüfparameter werden aufgezeigt, um die Verständlichkeit der in Kapitel 4 gezeigten Ergebnisse zu gewährleisten.

3.3.1 Zugversuch an Garnen nach DIN EN ISO 2062

Die Norm „DIN EN ISO 2062 – Garne von Aufmachungseinheiten – Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgerätes mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit (CRE)“ beschreibt mehrere Verfahren zur Ermittlung der Höchstzugkraft an Garnen. Neben einer Vorkonditionierung der Proben in Normklima sind Vorgaben zur Anzahl der Proben und die Auswahl der Garnaufmachungseinheiten beschrieben.

Die Einspannlänge ist mit 500 (± 2) mm vorgegeben, jedoch wäre eine Prüfung mit einer verkürzten Einspannlänge von 250 (± 1) mm zulässig. Die Vorspannkraft vor der Prüfung ist mit 0,5 cN/tex vorgegeben. Die Proben müssen vor der Prüfung an Normklima angeglichen werden. Die Prüfgeschwindigkeit ist, für eine Einspannlänge von 500 mm, auf 500 mm/min festgeschrieben. Für eine Einspannlänge von 250 mm gilt eine Prüfgeschwindigkeit von 250 mm/min. Bei automatischen Prüfungen sind Prüfgeschwindigkeiten bis 5000 mm/min zulässig.

Für die Bestimmung der Höchstzugkraft wurde ein manuelles Verfahren (manuelle Zufuhr, Einspannung und Entnahme der Proben) durchgeführt. Die Vorgabewerte für Vorspannkraft (0,5 cN/tex), Einspannlänge (500 mm) und Prüfgeschwindigkeit (500 mm/min) wurden eingehalten.

Die Anwendung der DIN EN ISO 2062 wurde im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen gewählt, da die Norm DIN EN ISO 2062 von vielen Garnherstellern als Grundlage zur Ermittlung der Höchstzugkräfte (z.B. für Datenblätter, Kataloge, Qualitätssicherung etc.) verwendet wird.



Abbildung 16: Prüfmaschine Inspekt 10 mit Garnklemmen zur Zugprüfung von Garnen

Zur Einspannung der Proben wurden spezielle, auf die Prüfung von Garnen optimierte, Klemmen eingesetzt. Die Prüfung der Garne wurde auf einer Standard-Zugprüfmaschine Inspekt 10, mit einer maximalen Prüfkraft von 10 kN, vom Prüfmaschinenhersteller Hegewald & Peschke durchgeführt (vgl. Abb. 16). Da mit den verwendeten Garnklemmen eine Messung der realen Dehnung über den Traversenweg nicht möglich ist, weil Dehnungseffekte auf den Umschlingungsbereichen das Ergebnis verfälschen würden, und die Maschine über keine zusätzlichen Messaufnehmer für die Dehnungsmessung verfügt, wurde die Ermittlung der Dehnung bei Bruch nicht durchgeführt. Die zur Prüfung gewählten Parameter sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Prüfparameter zur Zugprüfung an Garnen nach DIN EN ISO 2062

Parameter	Wert
Einspannlänge	500 mm
Vorkraft vor Prüfung	0,5 cN/dtex
Belastungsgeschwindigkeit	500 mm/min

3.3.2 Dichtebestimmung

Die Dichtebestimmung wurde als Auftriebsdichte in Ethanol mittels einer hydrostatischen Waage durchgeführt. Da die Dichte der untersuchten Werkstoffe geringer als die Dichte von Wasser ist, wurde als hydrostatisches Medium Ethanol verwendet. Die Dichte von Ethanol ist niedriger als die Dichte der zu untersuchenden Fasern, jedoch stark temperaturabhängig. Deshalb wird während der Dichtemessung die Temperatur konstant gehalten und aufgezeichnet.

Die Garnproben wurden im Labor für 120 Stunden bei 20°C klimatisiert. Eine Reinigung der Proben, um die Faserschichten zu entfernen, wurde nicht durchgeführt, da die Garne ohne Reinigung zu Seilen verarbeitet werden.

Die Bestimmung der Dichte wurde mittels einer hydrostatischen Waage (Sartorius MC BA 100, vgl. Abb. 17) in Anlehnung an ASTM D 3800M [AST11] durchgeführt. Dazu wird von der computergesteuerten Waage zunächst die Raumtemperatur gemessen. Im nächsten Schritt wird die Masse der Probe an Luft bestimmt. Direkt im Anschluss wird die Masse der Probe bestimmt, während die Probe vollständig in das Fluid Ethanol eingetaucht ist. Die Waage fragt dazu die Temperatur des Ethanols ab.

Die Dichte-Temperatur-Funktion für Ethanol ist im Computer der Waage hinterlegt. Die Auswertung erfolgt durch die Computersteuerung der Waage, sodass auf dem Display der Waage direkt der Wert der Dichte angezeigt wird.



Abbildung 17: Messaufbau zur Bestimmung der Dichte

3.3.3 Garnabrasionsversuche

Die Garnabrasionsversuche wurden in Anlehnung an die Norm ASTM D 6611 (vgl. [AST00]) durchgeführt, um bereits vor dem Beginn der Biegeversuche abschätzen zu können, ob die Garne einen ähnlichen Verschleißwiderstand gegen Faser-Faser-Reibung zeigen, da die Faser-Faser-Reibung wegen der bei Biegevorgängen möglichen Bewegung zwischen den Litzen einen Hauptversagensmechanismus darstellt [McK04].

Die Norm ASTM D 6611 beschreibt einen Versuchsaufbau, bei dem die Garne über Umlenkscheiben gelegt, einmal oder dreimal um sich selbst geschlungen (vgl. Abb.18) und mit einer Kraft zwischen 1% und 5% der Garnzugfestigkeit beaufschlagt werden. Es sollen nach ASTM D 6611 zwischen 60 und 70 Hübe pro Minute bei einem Hubweg von 50 mm erreicht werden.

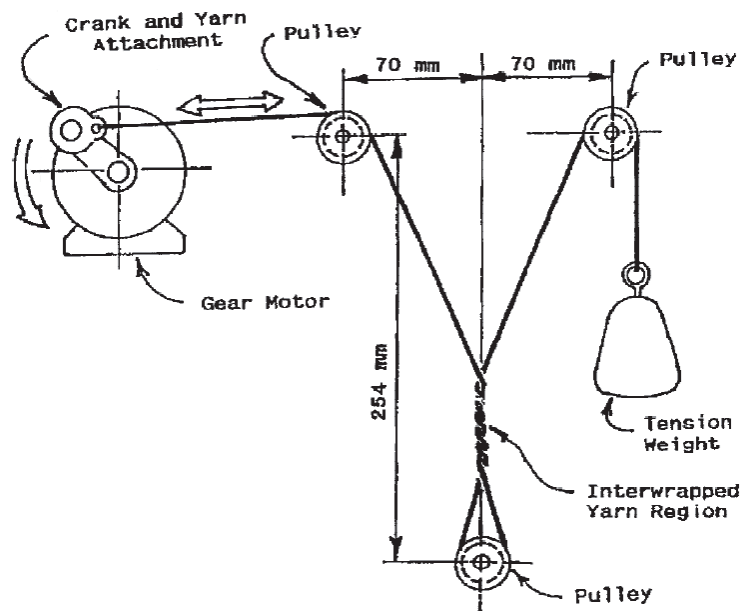


Abbildung 18: Prüfaufbau nach ASTM D 6611 (aus [AST00])

Bereits im Jahr 2011 wurde ein Prüfstand zur Durchführung der Versuche nach ASTM D 6611 in Konformität mit der Richtlinie 2006/42/EG für Maschinen umgesetzt, der seitens der Technischen Universität Chemnitz gebrauchsmusterrechtlich geschützt werden konnte (vgl. [Geb11]). In Abbildung 19 ist der Prüfstand, der die parallele Prüfung von 4 Proben ermöglicht, dargestellt.

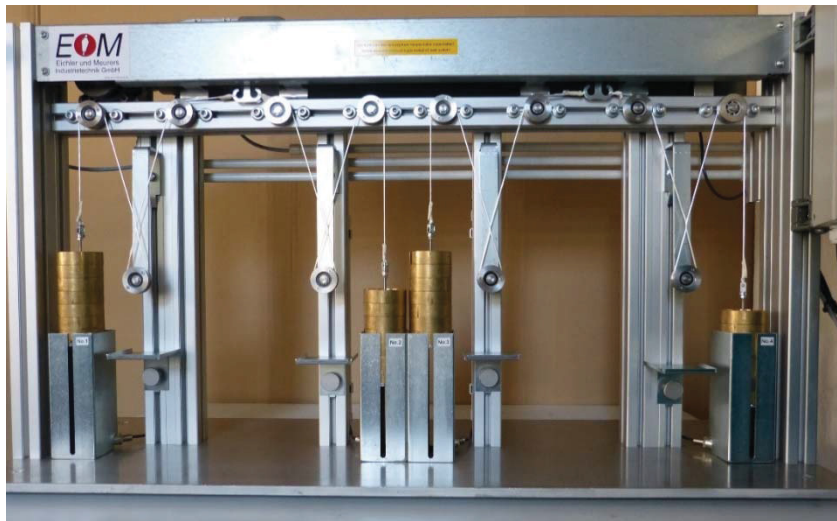


Abbildung 19: Faserstruktur-Abrasions-Prüfstand nach [Geb11]

Der Antrieb der Garne erfolgt, wie in ASTM D 6611 vorgeschrieben, über einen hinter der Abdeckung verborgenen Kurbeltrieb. Dabei treibt die Kurbel jedoch nicht direkt die Garnbefestigung an, sondern eine Schubstange, an der vier Garnbefestigungspunkte (Haken) befestigt sind. Der Prüfstand realisiert 67 Hübe pro Minute mit einer Hublänge von 50 mm und entspricht damit den Anforderungen der ASTM D 6611.

Die Versuche erfolgten an Proben der zur Seilherstellung verwendeten Litzen. Dabei wurde der in der Norm vorgeschriebene Grenzwert für die Feinheit der Textilien, welcher in ASTM D 6611 mit 300 tex festgelegt wird, überschritten. Die Feinheit der Litzen aus je 7 Garnen betrug ca. 1230 tex, was laut ASTM D 6611 zulässig ist, wenn im Prüfprotokoll ein entsprechender Vermerk erfolgt. Als Prüfungsgewicht wurden Gewichte mit einer Masse von 3500 g an jedem Garn befestigt. Auf die in ASTM D 6611 beschriebene Berechnung der logarithmischen Bruchzyklenzahlen wurde verzichtet, da der Versuch zur Einschätzung des zu erwartenden Verhaltens der Seile in den Dauerbiegeversuchen nach VDI 2358 (vgl. Kapitel 3.3.5) dient.

Eine weitere Abweichung vom Versuch nach ASTM D 6611 bestand darin, dass nicht eine oder drei volle Umschlingungen, sondern nur eine halbe Umschlingung (Umschlingungswinkel 180°; vgl. Abb. 20 Mitte), auf das Garn aufgebracht wurde.



Abbildung 20: Umschlingungswinkel von Garnen im Versuchsaufbau nach ASTM D 6611
 Links: 0° mit Punktkontakt; Mitte: 180°; Rechts: 360°

Diese Verfahrensweise wurde gewählt, da die Garne im geflochtenen Seil ebenfalls nicht vollständig umeinander geschlungen sind (vgl. Kap. 2.3.2, Abb. 8). Die Kontaktbedingungen im Versuch nach ASTM D 6611 sind so besser mit den Kontaktbedingungen im Seil vergleichbar, was später eine Abschätzung ermöglichen soll, ob die Ergebnisse der Garnabrasionsversuche nach ASTM D 6611 für eine aussagekräftige Abschätzung des Verhaltens im Dauerbiegeversuch herangezogen werden können.

Tabelle 8 gibt einen Überblick über die verwendeten Prüfparameter zur Garnabrasionsprüfung nach ASTM D 6611.

Tabelle 8: Prüfparameter zur Garnabrasionsprüfung nach ASTM D 6611

Parameter	Wert
Titer der Proben	ca. 1230 tex
Zwirnrate der Proben	25,8/m
Anzahl der Umschlingungen	0,5 (Umschlingungswinkel 180°)
Prüfgeschwindigkeit	67 Doppelhübe pro Minute
Masse der Prüfgewichte	3500 g
Zusatzmedien	Keine (Prüfung trocken)

3.3.4 Bestimmung der Verteilung der molaren Masse

Die Bestimmung der Verteilung der molaren Masse (im Weiteren als Molmasseverteilung bezeichnet) wurde mittels des Verfahrens der Gel-Permeations-Chromatographie durchgeführt.

Die Gel-Chromatographie, der die Gel-Permeations-Chromatographie (kurz: GPC) zuzuordnen ist (vgl. [Det67]), ist ein Verfahren, welches ursprünglich zur Trennung von Lösungen mit unterschiedlichen gelösten Stoffen entwickelt wurde. Es beruht auf dem Verhalten von gelösten, makromolekularen Substanzen in porösen Gelen, die in einem Quellmittel gequollen sind, wobei das Quellmittel des Gels mit dem Lösungsmittel der Lösung identisch ist [Det67]. Moleküle, die größer als die größte Pore im Gel sind, können nicht in das Gel hinein diffundieren, was bei kleineren Molekülen möglich ist, sondern sich lediglich im Lösungsmittel entlang der Grenzflächen des Gels bewegen. Das führt dazu, dass Moleküle unterschiedlicher Größe unterschiedliche Sedimentationsgeschwindigkeiten⁶ in Gel erreichen [Det67]. Gibt man ein gequollenes Gel mit dem Quellmittel in ein senkrecht stehendes, transparentes Rohr und gibt eine Lösung mit gelösten, unterschiedlich großen Molekülen auf die Oberfläche des Quellmittels, werden größere Moleküle schneller sedimentieren als kleinere [Det67]. In Abbildung 21 ist das durch die Molekülgröße bedingte Sedimentationsverhalten schematisch dargestellt. Dabei bezeichnet 'a' den Zustand direkt nach dem Aufsetzen der Lösung auf das Gelbett. Der Zustand 'b' zeigt die beginnende Trennung. Die kleineren Moleküle diffundieren in die Gelpartikel, während die größeren Moleküle nicht in das Gel eindringen können. Zustand 'c' zeigt einen Zustand mit fortgeschrittener Sedimentation der größeren Moleküle.

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der kleineren Moleküle wird durch Diffusion in die Gelpartikel verlangsamt, weshalb große Moleküle schneller absinken [Det67].

Geht man nun, wie im Falle der in dieser Arbeit untersuchten Fasern, von einem einheitlichen Werkstoff als gelöste Komponente aus, so werden die größeren Moleküle die mit der höheren Molmasse sein, die kleineren Moleküle diejenigen mit der kleineren Molmasse [Bön86] [Det67] [Dom05].

⁶ Als Sedimentation oder Sedimentierung bezeichnet man das Absinken/Absetzen von festen Bestandteilen in Suspensionen, aber auch das Durchsickern von gelösten Bestandteilen von Lösungen oder Suspensionen durch durchlässige Membranen (vgl. [Det67], [Min54]) zum Konzentrationsausgleich.

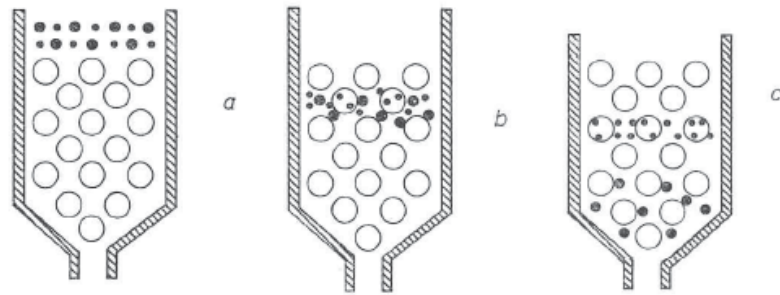


Abbildung 21: Sedimentationseffekte bei der Gel-Chromatographie (aus [Det67])

Über unterschiedliche Porengrößen im Material lassen sich mehrere verschiedene Molekülfractionen⁷ anhand ihrer Sedimentationsgeschwindigkeit trennen. Kennt man nun die Masse des gesamten in Lösung gebrachten Polymers, so kann man die Anteile der einzelnen Molekülfractionen auswiegen.

Durch permanentes Nachspülen mit reinem Lösungsmittel kann die Sedimentationsgeschwindigkeit erhöht werden [Det67]. Dieser Vorteil wird bei der Gel-Permeations-Chromatographie genutzt [Cow97] [Lec03]. Die Trennung erfolgt im Gel als ruhende, „stationäre Phase“ (Zitat aus [Lec03], S. 326), dessen Porengröße und Verteilung der Porengröße auf das zu untersuchende Polymer abgestimmt werden können, während das Lösungsmittel mit dem gelösten, zu untersuchenden Polymer eine strömende Phase bildet. Hält man die Durchflussgeschwindigkeit des Lösungsmittels niedrig und konstant, wird sich eine chromatographische Trennung derart einstellen, dass große Moleküle, die nicht in das Gelvolumen hinein diffundieren können, mit der Durchflussgeschwindigkeit des Lösungsmittels durch die Säule strömen. Moleküle, die in das Gel eindiffundieren können, werden entsprechend langsamer durch die Säule strömen, da die Diffusion im Gel langsamer abläuft als die Strömungsbewegung im Lösungsmittel [Cow97] [Det67] [Lec03]. Durch Hintereinanderschaltung mehrerer Säulen mit Gel unterschiedlicher Durchlässigkeit (auch Permeabilität; vgl. [Det67]), die auch Kolonnen genannt werden, können so nahezu alle Polymeren adequat untersucht und die Molmasseverteilung ermittelt werden [Cow97] [Lec03].

⁷ Als Fractionen werden hier Molekülketten in einem eng eingegrenzten Bereich des Wertes der Molmasse bezeichnet.

Da sich synthetische Makromoleküle meist aus einer Vielzahl von Molekülketten mit unterschiedlicher Molmasse zusammensetzen [Det67] [Dom05], sind die exakte Auftrennung aller vorhandenen molekulareinheitlichen Fraktionen, also aller Moleküle mit exakt gleicher Molmasse, und die exakte Bestimmung aller Fraktionen technisch kaum erreichbar [Det67]. Daher wird als Ergebnis der Messung üblicherweise das Gewichtsmittel der Molmasse angegeben.

Das Gewichtsmittel bezeichnet dabei die molare Masse eines theoretischen, chemisch identischen Polymers mit einer einheitlichen Molekülfraction, welches die gleichen Sedimentationseigenschaften hätte [Det67]. Zur Bestimmung des Gewichtsmittels werden die in das Gel diffundierten Fraktionen der Polymere aus dem Gel heraus gelöst. Über die Gewichtsanteile c_i der Fraktionen und die zugehörigen Molmassen M_i wird das Gewichtsmittel der Molmasse wie folgt berechnet (vgl. [Det67]):

$$\bar{M}_w = \frac{\sum (c_i \cdot M_i)}{c_i} \quad (1)$$

Zusätzlich wird als weitere Kenngröße das Zahlenmittel \bar{M}_n der Molmassen bestimmt [Det67]:

$$\bar{M}_n = \frac{\sum c_i}{\sum \left(\frac{c_i}{M_i} \right)} \quad (2)$$

Das Zahlenmittel der Molmasse gibt dabei den Mittelwert aller im Polymer vorhandenen Molekulargewichte an und berücksichtigt nicht deren Häufigkeit, was dazu führt, dass dieser Wert niedriger ist, als der Wert des Gewichtsmittels, da hier Individualmoleküle mit kleinerer Molmasse stärkeren Einfluss haben [Det67].

Als „Maß für die Uneinheitlichkeit des Gemisches“ (Zitat aus [Det67], S. 128) wird der Polydispersitätsindex (im Weiteren PDI genannt) als Quotient von Gewichtsmittel und Zahlenmittel der Molmasse nach Gleichung 3 bestimmt:

$$PDI = \frac{\bar{M}_w}{\bar{M}_n} \quad (3)$$

Bei einer einheitlichen Molekulargewichtsfraction ist der Wert für den Polydispersitätsindex $PDI = 1$. Je höher der Wert wird, umso mehr verschiedene Molekülfractionen sind im Polymer enthalten [Det67].

Aus den Werten der Molmasseverteilung und des Polydispersitätsindex können Rückschlüsse auf Festigkeitseigenschaften gezogen werden. Je niedriger der Wert des PDI, umso gleichmäßiger sind die Eigenschaften der Polymere [Ehr03] [Det67], da weniger lokale Unterschiede in den Kristallisationsbedingungen vorherrschen.

Zur Durchführung der Gel-Permeations-Chromatographie werden spezielle Apparate verwendet, die eine chromatographische Trennung bei hohen Temperaturen ermöglichen. Zusätzlich ermöglichen diese Apparate die Aufzeichnung einer Verteilungskurve, welche mit den Gleichungen 1 bis 3 das Bestimmen von Unterschieden zwischen verschiedenen Werkstoffen mit gleicher oder ähnlicher chemischer Basis erlaubt. Zur Aufzeichnung der Verteilungskurven muss die Konzentration jeder Fraktion im Eluat ⁸ bekannt sein [Lec03]. Während der GPC kann dies dadurch geschehen, dass der Brechungsindex des Eluats mittels eines Differentialrefraktometers bestimmt wird. Über einen Vergleich mit den Brechungsindizes des reinen, zur GPC verwendeten Lösungsmittels, kann die Konzentration des Polymers bestimmt werden. Eine Bestimmung der Konzentration des Polymers im Eluat kann weiterhin über unterschiedliche UV-Absorptionsspektren im UV-VIS-Spektrometer realisiert werden.

Von großer Bedeutung ist bei der GPC eine dem zu prüfenden Polymer entsprechende Kalibrierung der Messeinrichtung. Bei ultrahochmolekularem Polyethylen in Lösungen treten, wie in Kapitel 2.6 bereits gezeigt, meist globulare Strukturen auf. Ein poröses Gel weist jedoch eine obere und eine untere Ausschlussgrenze auf, da das Verfahren nicht nach der absoluten Molmasse sondern nach dem hydrodynamischen Volumen ⁹ trennt, was dazu führt, dass Moleküle die größer als die obere Ausschlussgrenze und Moleküle die kleiner als die untere Ausschlussgrenze sind nicht getrennt werden und gleich schnell durch die Kolonnen wandern. Die Moleküle deren Molmasse zwischen den Ausschlussgrenzen liegt, wandern unterschiedlich schnell durch die Kolonne. Daher müssen die Versuchsapparate mit Testsubstanzen bekannter Molmassenverteilung geeicht werden [Lec03], um die im Polymer enthalten Fraktionen möglichst genau trennen zu können. Durch die für das Verfahren nötige Kalibrierung ist die GPC-Analyse ein relatives Analyseverfahren, da die Ermittlung der Kurve in relativem Bezug auf den Kalibrierwerkstoff erfolgt.

⁸ Eluat bezeichnet eine durch GPC getrennte Fraktion.

⁹ Das hydrodynamische Volumen beschreibt das Volumen einer hypothetisch festen Kugel, die in einem Lösungsmittel vergleichbare Diffusionseigenschaften zeigen würde, wie das beschriebene Molekül.

Die Gel-Permeations-Chromatographie an den untersuchten Polymerfasern wurde bei der Firma PSS in Mainz, einem Hersteller von Apparaten zur Gel-Permeations-Chromatographie, als Auftragsdienstleistung durchgeführt, da die Bestimmung der Molmasseverteilung an den verwendeten UHMW Polyethylenwerkstoffen bei Temperaturen von 160°C an der TU Chemnitz nicht möglich war.

Es wurden Proben mit einer Masse von etwa 30 mg ausgewogen und in je 9 ml 1,2,4-Trichlorbenzol gegeben. Durch Schütteln über 5 Stunden bei einer Temperatur von 160°C wurde eine Lösung mit einer Polymerkonzentration von $c_L \approx 3 \text{ g/l}$ hergestellt. Von dieser Lösung wurden 200 µl zur Messung verwendet.

Die Apparatur wurde auf Polystyrol-Standard kalibriert. Dazu wurden die Molmassen von verschiedenen Polystyrol-Werkstoffen mit bekannter Molmasse unter Verwendung des zur Messung verwendeten Lösungsmittels bestimmt. Über die Abweichung der Messung von den bekannten Werten der Molmasse wurde eine Kalibrierkurve erstellt (vgl. Anlage VII), welche als Basis für die Bestimmung der Molmasseverteilung an den zu untersuchenden UHMW Polyethylenen dient.

Bei einer Kalibrierung auf Polystyrol ist eine Messung an Polystyrol und chemisch ähnlichen Proben möglich. Da die Trennung der Molekülfraktionen bei der GPC nach hydrodynamischen Volumina und nicht nach absoluter Molmasse erfolgt, können die realen Werte im vorliegenden Fall etwas höher liegen.

Die Bestimmung der mittleren Molmassen und Aufzeichnung der Verteilungskurven der UHMW Polyethylenwerkstoffe erfolgte auf Basis dieser Kalibrierung rechnergestützt, mit der Software PSS-WinGPC UniChrom (Vers. 8.1).

Eine Übersicht über die Einstellungen bzw. Parameter zur Bestimmung der Molmasseverteilung ist in Tabelle 9 zu finden.

Tabelle 9: Prüfparameter zur Bestimmung der Molmasseverteilung

Parameter	Wert
Masse der Faserproben	30 mg
Lösungsmittel	1,2,4-Trichlorbenzol
Polymerkonzentration im Lösungsmittel	$\approx 3 \text{ g/l}$
Temperatur zur Lösungsherstellung	160°C
Polymer zur Kalibrierung	diverse Polystyrol-Typen
Volumen der Probelösung zur Messung	200 µl
Temperatur bei Messung	160°C

3.3.5 Dynamische Differenzkalorimetrie

Die dynamische Differenzkalorimetrie oder dynamische Differenz-Thermoanalyse (engl.: Differential Scanning Calorimetry; kurz: DSC) ist ein Verfahren zur Bestimmung von charakteristischen Kennwerten sowie des thermischen Verhaltens von Kunststoffen [ISO10]. Das Verfahren ist in der Norm DIN EN ISO 11357-1:2010 beschrieben und dient zur Ermittlung folgender polymerspezifischer Kennwerte:

- Glasübergangspunkt (oder Bereich)
- Schmelzpunkt (oder Bereich)
- Rekristallisationspunkt (oder Bereich)
- Temperaturabhängige Änderungen der Morphologie
- Oxidationsstabilität
- Grenztemperaturen für chemische Reaktionen (z.B. nachträgliche Vernetzung, Vulkanisation oder Polymerisation)
- Spezifische Wärmekapazität

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde die DSC genutzt um die Schmelzbereiche zu ermitteln, was als Grundlage für die Ermittlung der Verarbeitungstemperaturen für die Thermofixierversuche diente. Zusätzlich kann aus der DSC die Schmelzenthalpie des untersuchten Polymers ermittelt werden. Mit Hilfe eines theoretischen Wertes für die Schmelzenthalpie eines Polyethylenekristalles von $\Delta H_{f100\%} = 293 \text{ J/g}$ [Sch01] lässt sich die Kristallinität (in diesem Fall die durch Verstrecken erzeugte Orientierung der Moleküle entlang der Faserachse) der Fasern im Lieferzustand abschätzen.

Für die Durchführung der Messung werden bei der dynamischen Differenzkalorimetrie zwei gasdicht abgeriegelte Tiegel aufgeheizt. Dabei enthält ein Tiegel die Polymerprobe, der zweite ist leer und dient als Referenztiegel. Beide Tiegel werden einem „kontrollierten Temperaturprogramm“ (Zitat aus [ISO10], Seite 6) unterworfen, wobei die Differenz der Wärmeströme zwischen Proben Tiegel und Referenztiegel gemessen wird.

Die Versuche wurden mit einem an der TU Chemnitz vorhandenen Messsystem DSC Q2000 der Firma TA INSTRUMENTS (vgl. Abb. 22) durchgeführt.



Abbildung 22: Messsystem zur Durchführung der DSC

Aus Literaturquellen zur thermischen Analyse von Kunststoffen ist bekannt, dass für die Bestimmung der Schmelzbereiche eine kontinuierliche Temperaturerhöhung von 10 K/min zielführend im Sinne einer aussagekräftigen Messung ist [Ehr03], was mit den Vorgaben in DIN EN ISO 11357-1 (10 K/min oder 20 K/min, vgl. [ISO10]) übereinstimmt. Die Messungen wurden im Temperaturbereich von $20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 250^{\circ}\text{C}$ durchgeführt, da das Hauptaugenmerk auf der Ermittlung der Schmelzenthalpie und der Schmelzbereiche lag. Tabelle 10 zeigt einen Überblick über die Prüfparameter zur dynamischen Differenzkalorimetrie.

Tabelle 10: Prüfparameter zur Differenzkalorimetrie

Parameter	Wert
Masse der Faserproben:	6 mg – 7 mg
Temperaturbereich:	$20^{\circ}\text{C} - 250^{\circ}\text{C}$
Aufheizgeschwindigkeit:	10 K/min
Abkühlgeschwindigkeit:	10 K/min
Anzahl der Aufheizzyklen:	2
Anzahl der Abkühlzyklen:	1

3.3.6 Prüfung der Eigenschaften von Faserseilen nach DIN EN ISO 2307

Die Norm „DIN EN ISO 2307:2011 – Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“ ist eine international gültige Norm, die das Vorgehen bei der Bestimmung einiger Eigenschaften von Faserseilen beschreibt. Neben Vorgaben zur Maschinentechnik, wird die Bestimmung der Seilfeinheit, die Messung von Schlag- bzw. Flechtlänge, die Messung der Dehnung und der Bruchkraft und die Bestimmung der Wasserabstoßung beschrieben (vgl. [DIN11]). Für die in dieser Arbeit gezeigten Untersuchungen sind die Versuche zur Bestimmung der Seilfeinheit, der Flechtlänge und der Bruchkraft relevant.

Die Bestimmung der Feinheit ρ_1 von Faserseilen erfolgt, in dem ein Stück Probeseil mit einer Länge von 2 Meter oder mehr, zuzüglich der für die Einspannung nötigen Länge, mit einer Nennkraft beaufschlagt wird. Die Nennkraft ist für eine Minute aufrecht zu erhalten. Nach Ablauf von einer Minute sind zwei Markierungen im Abstand von 2 Meter anzubringen. Die Probe wird entlastet und an den Markierungen sauber getrennt. Zur Bestimmung der Feinheit ρ_1 des Seiles ist nun die Masse m der abgetrennten Probe und die Länge l_1 der Probe zu bestimmen, und die Feinheit über Gleichung 4 zu berechnen. Das Ergebnis ist in der Einheit ktex (1 ktex = 1 g/m) anzugeben (vgl. [DIN11]).

$$\rho_1 = \frac{m}{l_1} \quad (4)$$

Die Bestimmung der Feinheit der geprüften Seile nach DIN EN ISO 2307 erfolgte vor dem Beginn der Untersuchungen und im Anschluss an die Thermofixierversuche, welche in einem späteren Abschnitt detailliert beschrieben werden.

Die Messung der Flechtlänge erfolgt ebenfalls unter Anlegen der Nennkraft. Dazu ist auf der gesamten freien Länge des Seiles die maximal mögliche Anzahl der Flechtlängen zu bestimmen und nach Gleichung 5 die Flechtlänge (bzw. Schlaglänge) l_p zu errechnen, wobei l_i die Länge einer Anzahl i ¹⁰ an Flechtlängen beschreibt. Das Ergebnis ist in der Einheit mm anzugeben.

$$l_p = \frac{l_i}{i} \quad (5)$$

¹⁰ Es wird die Verwendung des Index 'i' statt dem in der Norm (vgl. [DIN11]) verwendeten Index 'n' bevorzugt, um Verwechslungen mit dem Formelzeichen n der Stoffmenge (vgl. Kapitel 2.3.6) zu vermeiden.

Die Nennkraft F_T zur Bestimmung der Seilfeinheit ρ_1 und der Flechtlänge l_p ist, entsprechend Anhang A in DIN EN ISO 2307 (vgl. [DIN11]), zu berechnen nach:

$$F_T = \frac{n_{ref}^2}{8} \cdot 0,01 \quad (6)$$

Dabei bezeichnet n_{ref} die Nenngroße der Seile in mm (es gilt: $n_{ref} = d_N$). Für Seile mit einem Nenndurchmesser $d_N = 6$ mm ergibt sich ein Wert von $F_T = 0,045$ kN = 45 N.

Zur Ermittlung der Bruchkraft von Faserseilen aus Chemiefasern schreibt DIN EN ISO 2307 eine Prüfgeschwindigkeit von $v_{Prüf} = 250$ mm/min (± 50 mm/min) vor, was mit der an der TU Chemnitz vorhandenen Zugprüfmaschine Zwick/Roell Z150 realisiert werden kann. Da diese Prüfmaschine mit Kraftabbaurollen (auch Cors de Chasse, vgl. [DIN11]) arbeitet, und der Seildurchmesser bei $d_N = 6$ mm liegt, ist eine freie Prüflänge von mindestens $l_0 = 400$ mm vorgeschrieben (vgl. [DIN11]), was ebenfalls erreicht werden konnte.

Weiterhin ist das Verhältnis zwischen dem Durchmesser der ‘Cors de Chasse’ und dem Seilnenndurchmesser (D/d -Verhältnis) mit $D/d \geq 10$ vorgegeben. Es wurden Kraftabbaurollen mit einem Durchmesser von 120 mm verwendet, wodurch mit den verwendeten Seilen mit $d_N = 6$ mm ein Verhältnis von $D/d = 20$ erreicht werden konnte. Die Klemmung der Seile am Auslauf der Kraftabbaurollen erfolgte mittels hydraulisch betätigten Spannbacken. Abbildung 23 zeigt den grundlegenden Versuchsaufbau.

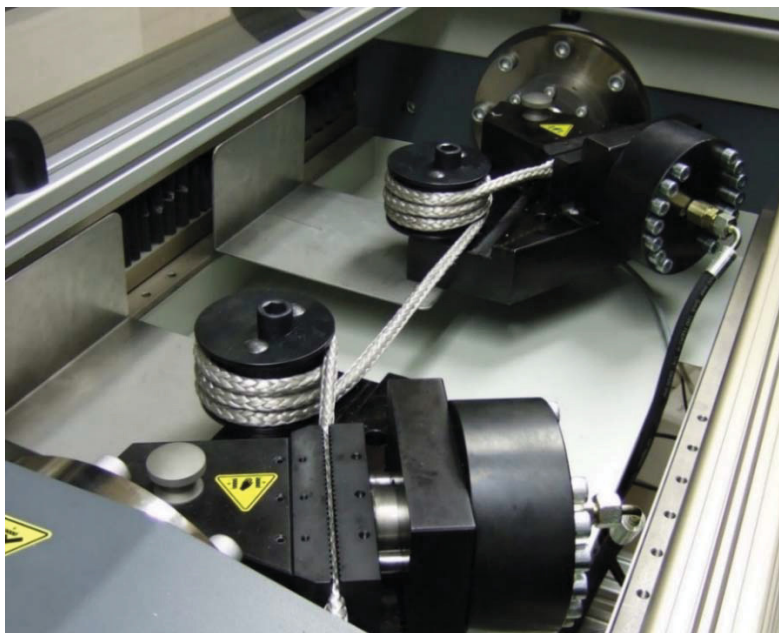


Abbildung 23: Aufbau zur Bestimmung der Bruchkraft nach DIN EN ISO 2307

Die Bestimmung der Bruchkraft nach DIN EN ISO 2307 läuft an der verwendeten Prüfmaschine Zwick/Roell Z150 so ab, dass das Seil eingespannt und auf Nennkraft belastet wird. Anschließend werden die optischen Sensoren zur Dehnungsmessung eingemessen. Das Seil wird, wie in DIN EN ISO 2307 vorgeschrieben, zunächst dreimal auf 50% der Mindestbruchkraft belastet und wieder entlastet. Erst nach Abschluss des dritten Belastungszyklus erfolgt die Belastung bis Bruch (vgl. Abb. 24).

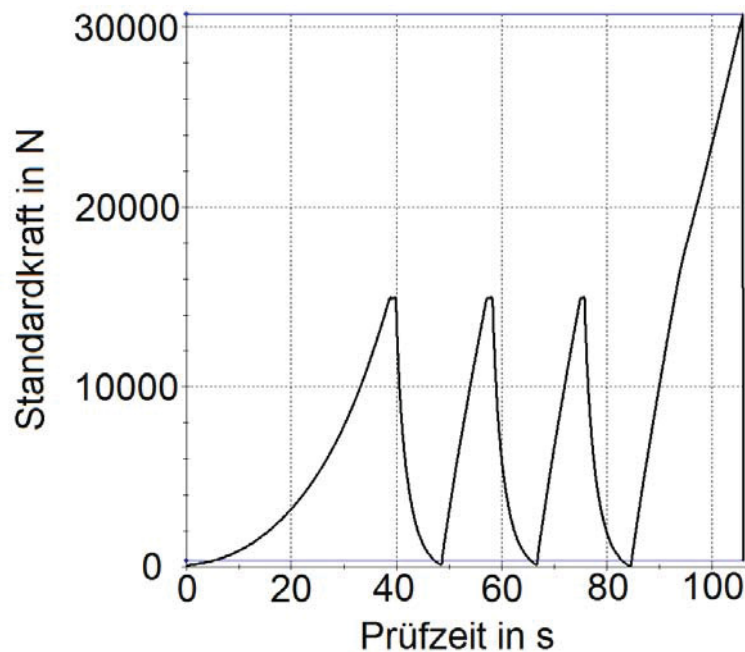


Abbildung 24: Kraft-Zeit-Verlauf bei der Bestimmung der Bruchkraft nach DIN EN ISO 2307

Das Aufnehmen einer Kraft-Dehnungs-Kurve ist nach Norm zulässig, jedoch nicht vorgeschrieben, da laut DIN EN ISO 2307 zur Bestimmung der Dehnung 5 Setzzyklen bei 50% der Mindestbruchkraft (statt der applizierten 3 Setzzyklen) vorgeschrieben sind. Für die im Weiteren dargestellten Versuche werden ausschließlich die Bruchkräfte ausgewertet.

Tabelle 11 zeigt zusammenfassend die für die Ermittlung der verschiedenen Kennwerte zugrunde gelegten Prüfparameter. Für alle Versuche wurde das Einspannsystem der Umschlingungsrollen (Cors de Chasse) mit einem D/d -Verhältnis von $D/d = 20$ gewählt.

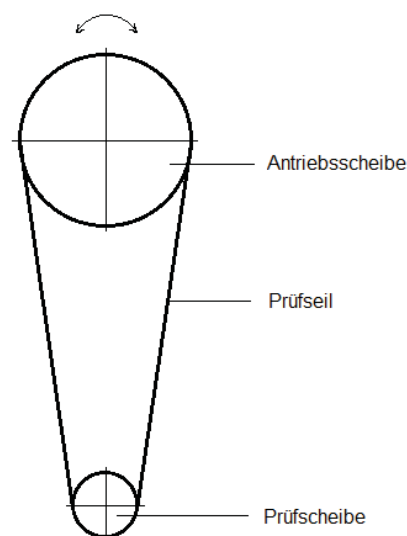
Tabelle 11: Prüfparameter zur Bestimmung einiger Seilkennwerte

Zu bestimmender Kennwert	Parameter	Wert
Seilfeinheit	Vorkraft:	45 N
	Probenlänge:	2000 mm
Flechtlänge	Vorkraft:	45 N
	Probenlänge:	2000 mm
Bruchkraft	Vorkraft:	45 N
	Freie Länge:	600 mm
	Kraft im Setzzyklus:	50% F_B
	Prüfgeschwindigkeit:	250 mm/min

3.3.7 Dauerbiegeversuche nach VDI 2358

Für die Durchführung von Dauerbiegeversuchen an Faserseilen existieren aktuell keine Normen oder Prüfvorschriften. Daher wurde die Richtlinie VDI 2358 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) als Prüfvorschrift für die Versuche gewählt. In Kapitel 10.3 der Richtlinie (vgl. [VDI84]) sind Funktionsschemata für Versuchsaufbauten zur Durchführung von Dauerbiegeversuchen an Drahtseilen beschrieben.

Für die Versuche an Faserseilen wurde ein Versuchsaufbau gewählt, welcher Dauerbiegeversuche nach dem in VDI 2358 beschriebenen Schema der Einfachbiegung (vgl. Abb. 25) ermöglicht.

**Abbildung 25: Schema der Dauerbiegung als Einfachbiegung (nach [VDI84])**

Wie in VDI 2358 gezeigt, werden die Seile endlos verbunden und zwischen Antriebsscheibe und Prüfscheibe eingespannt. Die Biegeprüfung erfolgt auf der Prüfscheibe, weshalb sicherzustellen ist, dass der Durchmesser der Antriebsscheibe größer als der Durchmesser der Prüfscheibe ist.

Abweichend von dem in Abbildung 25 dargestellten Schema, sind an dem für die hier gezeigten Versuche verwendeten Prüfstand WBM 25 die Antriebsscheibe unten und die Prüfscheibe oben angeordnet (vgl. Abb. 26). Die Vorspannung erfolgt über ein Spindelgetriebe, die Überwachung und Regelung der Prüfkraft erfolgt über eine integrierte Kraftmessdose. Die Steuerung der Biegelänge wird über einen Antriebsmotor mit integriertem Wegmesssystem realisiert.

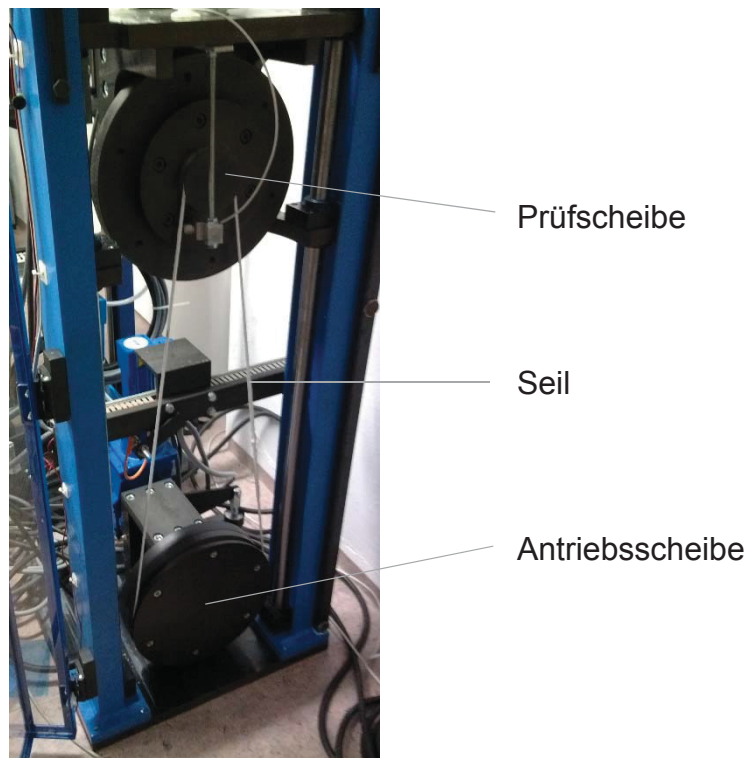


Abbildung 26: Aufbau für Dauerbiegeversuche an WBM 25

Um eine Aussage über die Abhängigkeit des Dauerbiegeverhaltens von der Zugbelastung treffen zu können, wird hier festgelegt, dass die Ersatzspannungen im Seil zwischen 100 N/mm^2 und 300 N/mm^2 in Schritten von 100 N/mm^2 zu variieren sind. Diese Werte werden ausgewählt, da für die Faser Dyneema® SK75 im Datenblatt die Kriechraten bei Spannungen von 300 MPa angegeben werden [Dyn08]. Da die Kriechrate in diesem Fall 0,02% pro Tag und damit ca. 7,3% pro Jahr beträgt, wird davon ausgegangen, dass ein Einsatz der Fasern unter höheren Belastungen

unzweckmäßig ist, weil dann das Kriechen ein Hauptbestandteil der Schädigung im Dauerbiegeversuch werden kann [McK04]. Für diese Versuche sind die Biegefrequenz und die Biegelänge konstant zu halten.

Für die Untersuchung der Abhängigkeit von der Biegefrequenz und der Seilgeschwindigkeit sind eine konstante Prüfkraft (bezogen auf eine bestimmte Ersatzspannung) einzustellen und Versuche mit der doppelten Biegefrequenz durchzuführen. Diese Versuche sind unter verschiedenen Ersatzspannungen zu wiederholen.

Eine weitere bekannte Einflussgröße auf die Lebensdauer bei der Faser Dyneema® SK75 ist die Länge der Biegezone bei konstanter Seilgeschwindigkeit (vgl. [Hei13]), weshalb zusätzlich Versuche mit unterschiedlicher Länge der Biegezone durchgeführt werden sollen. Dabei ist die Biegefrequenz derart an die Biegelänge anzupassen, dass die Seilgeschwindigkeit konstant bleibt.

Das Verhältnis zwischen Durchmesser der Prüfscheibe und dem Seilnennendurchmesser (D/d -Verhältnis) hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Lebensdauer von Faserseilen im Dauerbiegeversuch. Dabei nehmen die ertragbaren Biegewechsel bis zum Bruch des Seiles mit kleinerem D/d -Verhältnis ab. Das kleinste, in veröffentlichten Untersuchungen zur Dauerbiegung von Faserseilen verwendete, Durchmesser Verhältnis zwischen Prüfscheibendurchmesser und Seildurchmesser beträgt $D/d = 12,5$ und wurde für die durchzuführenden Versuche übernommen. Die Dauerbiegeversuche sind bis zum Bruch der Probe durchgeführt worden. In Tabelle 12 sind die Parameter-Variationen dargestellt, wie Sie für Seile aus jedem der untersuchten Fasertypen angewendet wurden.

Tabelle 12: Parametervariationen im Dauerbiegeversuch

Maschinenparameter	Biegelänge	Biegefrequenz	Ersatzspannung im Seil
Einstellwert	250 mm	10/min	100 N/mm ² 200 N/mm ² 300 N/mm ²
	250 mm	20/min	100 N/mm ² 200 N/mm ² 300 N/mm ²
	360 mm	7/min	100 N/mm ²
	500 mm	5/min	100 N/mm ²

3.3.8 Thermofixierversuche

Als Versuchseinrichtung zur Durchführung der Thermofixierversuche dient die an der Technischen Universität vorhandene Anlage "Rope Liner" der MAGEBA Textilmaschinen GmbH & Co.KG (vgl. Abb. 27). Diese Anlage dient zur Veredlung von Faserseilen und ermöglicht das Beschichten, das Thermofixieren sowie das kombinierte Beschichten und Thermofixieren von Faserseilen.

Die Beschichtungsanlage ist in einzelne Aggregate unterteilt, die getrennt voneinander angesteuert werden können. Dies ermöglicht beispielsweise, Trockner zu überbrücken, wenn das Thermofixieren ohne Beschichten ausgeführt wird.

Die Anlage ist eine für den Labor- und Kleinstserienbetrieb optimierte Spezialanfertigung, die über das volle Leistungsspektrum einer Großserienanlage verfügt. Lediglich bei der maximalen Arbeitsgeschwindigkeit ist die Maschine auf eine maximale Durchlaufgeschwindigkeit von 5 m/min limitiert.

Die Anlage beinhaltet eine Beschichtungseinheit mit Foulard (Quetschwerk), die für die Thermofixierversuche im Rahmen der Arbeit umgangen wurde. Der angeschlossene Infrarot-Trockner wurde deaktiviert, konnte jedoch zur Aufrechterhaltung einer Vorspannkraft nicht überbrückt werden.

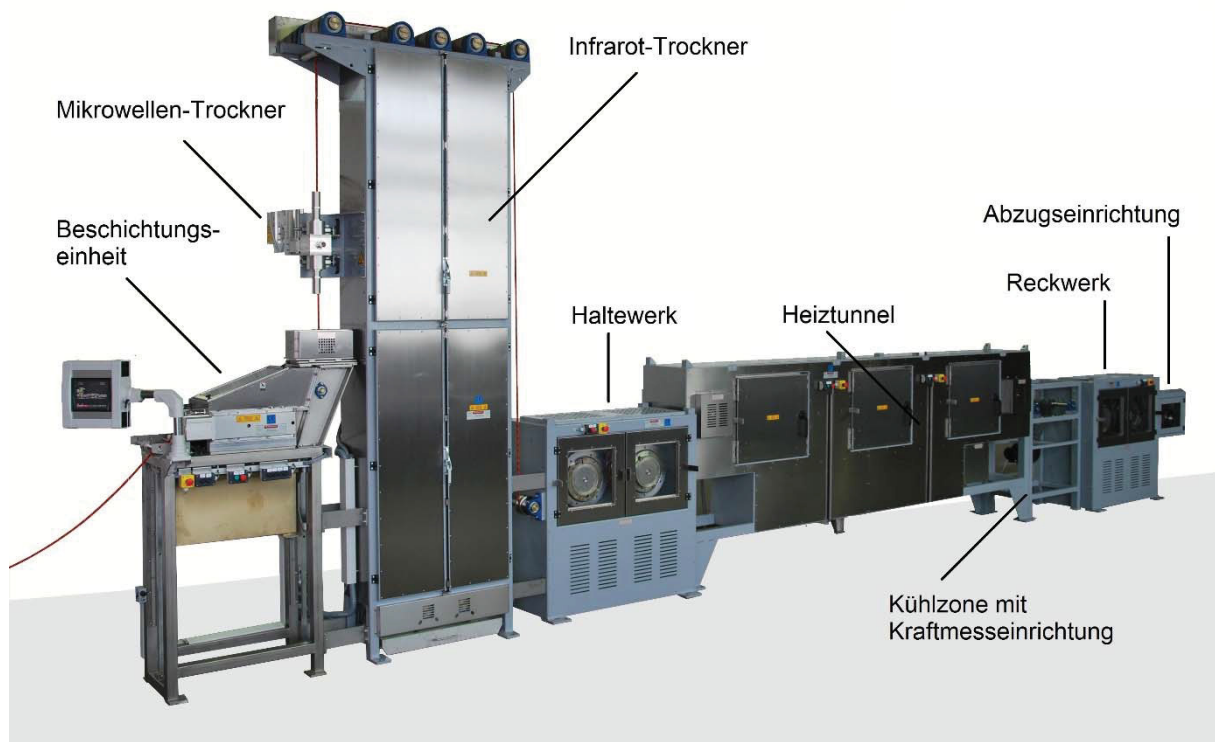


Abbildung 27: Thermofixieranlage Rope Liner

Wie bereits im Kapitel 2.2.4 beschrieben, wird bei dieser Anlage die Krafteinleitung in das Faserseil über eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Halte- und Reckwerk erzeugt. Die Anlage erlaubt dabei zwei Betriebsmodi:

Im Betriebsmodus mit weggeregeltem Betrieb wird eine konstante Geschwindigkeitsdifferenz eingestellt (z.B. Haltewerk 10% schneller als Reckwerk). Dies erlaubt prinzipiell eine konstante Verstreckung des zu fixierenden Seiles. Problematisch bei diesem Betriebsmodus ist, dass Seile aus Polyethylenfasern einen niedrigen Haftreibungswert gegenüber Stahl aufweisen ($\mu_H \approx 0,08$; [Mic11]), was dazu führen kann, dass zwischen den Umschlingungsrollen in Halte- bzw. Reckwerk und dem Seil Schlupf auftritt. Dieser Schlupf kann zu einem Kraftabfall führen, der zu unterschiedlich stark fixierten Bereichen im Seil führt, da ein optimales Thermofixierungsergebnis immer eine optimale Kombination aus Fixierkraft und Temperatur darstellt [HeM11] [Mam14]. Um solche haftungsbedingten Kraftschwankungen im Betrieb ausgleichen zu können, verfügt die Thermofixieranlage zusätzlich über die Möglichkeit eines kraftgeregelten Betriebsmodus. Dabei wird die Seilkraft über eine integrierte Kraftmessdose aufgenommen. Der Bediener stellt einen Zielwert für die Fixierkraft ein und die Steuerung der Maschine regelt die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Halte- und Reckwerk automatisch nach. Vorteil einer solchen Betriebsweise ist, dass auftretende Schlupfeffekte durch gezielten Eingriff der Steuerung ausgeglichen werden.

Für die durchgeführten Versuche wurde der kraftgeregelte Betriebsmodus gewählt. Da nur kurze Seilstücke mit einer Länge von ca. 35 Metern thermofixiert worden sind, war es zwingend nötig, auf den kurzen Seillängen möglichst gleichmäßige Fixierungsergebnisse zu erzielen.

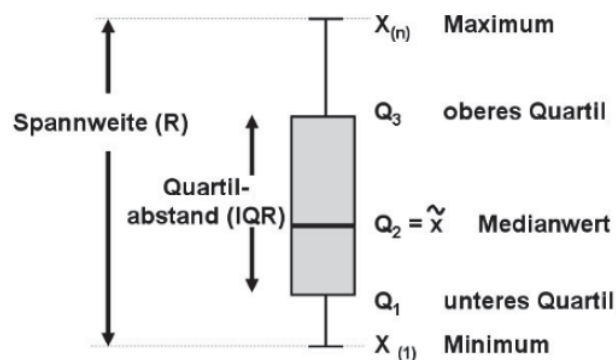
Als Fixierkraft wurden jeweils 12% der Bruchkraft der Seile festgesetzt. Die Fixiertemperatur wurde zwischen 130°C und 150°C in Schritten von 5 Kelvin variiert. Im Heiztunnel wurde ein Wareninhalt von 12,5 Metern installiert, was unter Berücksichtigung einer Haltezeit von 3 Minuten und einer Durchwärmzeit von ca. 2 Minuten (auf eine Temperatur von 130°C) zu einer Maschinengeschwindigkeit von 2,5 m/min führt. Für die Temperaturen oberhalb von 140°C wurde die Maschinengeschwindigkeit auf 2,4 m/min reduziert, wodurch die Verweildauer im Heiztunnel um 12,5 Sekunden erhöht wurde. Die Versuchsparameter sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Versuchsparameter beim Thermofixieren

Parameter	Wert
Relative Fixierkraft	12% F_B
Fixiertemperaturen	130°C, 135°C, 140°C, 145°C, 150°C
Maschinengeschwindigkeit	2,5 m/min (bis 140°C) 2,4 m/min (ab 145°C)

3.3.9 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung einiger mechanischer Versuche (Zugversuche an Garnen; Zugversuche an Seilen vor und nach den Thermofixierversuchen) erfolgte über die Software STATISTICAL LAB (Version 3.81 beta) vom Center für Digitale Systeme der Freien Universität Berlin. Diese auf der Programmiersprache 'R' basierende Software mit grafischer Benutzeroberfläche ist frei erhältlich und ermöglicht den direkten Import von Daten aus Microsoft Excel, sowie die Erzeugung von Diagrammen und Trendkurven. Dieses Programm wurde gewählt, um eine Darstellung von Boxplots zu ermöglichen. Obwohl in der Statistik empfohlen wird, erst ab einer Losgröße von mindestens 12 Proben, besser erst ab einer Losgröße von 20 Proben, die Darstellung in Form von Boxplots zu wählen [Sac07], wurde auf diese Darstellungsform auch für kleinere Losgrößen zurückgegriffen, da diese Darstellung den Vorteil bietet, dass nicht nur mittlere Werte und die Standardabweichung angegeben werden, sondern anhand der Darstellung ebenfalls ersichtlich ist, in welchem Bereich zwischen höchstem und niedrigstem Messwert sich die Mehrheit der Messwerte aus der Stichprobe befindet. In Abbildung 28, welche aus [Sac07] entnommen wurde, ist ein Boxplot mit seinen charakteristischen Maßzahlen dargestellt.

**Abbildung 28: Boxplot mit Maßzahlen (aus [Sac07])**

Um die Maßzahlen zu ermitteln, werden die Messwerte (erfolgt in der Software automatisch) aufsteigend nach der Größe sortiert.

Die Maßzahlen $x_{(1)}$ und $x_{(a)}$ ¹¹ werden dabei durch den kleinsten ($x_{(1)}$) bzw. größten ($x_{(a)}$) Messwert bestimmt, wobei a die Anzahl der Messwerte bezeichnet. Der Median Q_2 bezeichnet den mittleren aller aufgenommenen Werte einer Messwertreihe und wird nach [Sac07] über Gleichung 7 berechnet:

$$Q_2 = \tilde{X} = x_l \text{ wobei gilt: } l = \frac{1}{2}(a + 1) \quad (7)$$

Der Median wird im Boxplot üblicherweise als Linie mit höherer Strichstärke dargestellt. Das untere Quartil Q_1 und das obere Quartil Q_3 werden nach Gleichungen 8 und 9 (vgl. [Sac07]) berechnet und bezeichnen den Bereich, in dem 50% aller Messwerte liegen.

$$Q_1 = x_k \text{ wobei gilt: } k = \frac{1}{4}(a + 1) \quad (8)$$

$$Q_3 = x_m \text{ wobei gilt: } m = \frac{3}{4}(a + 1) \quad (9)$$

Um tatsächliche Maxima und Minima von sogenannten Ausreißern unterscheiden zu können, wird durch die Software STATISTICAL LAB geprüft, ob der Abstand zwischen dem Maximum und oberem Quartil bzw. Minimum und unterem Quartil höchstens 50% des Abstandes zwischen Median und dem jeweiligen Quartil beträgt (vgl. Gleichungen 10 und 11).

$$x_{(a)} \text{ ist Maximum, wenn: } Q_3 < x_n \leq Q_3 + 1,5(Q_3 - Q_2) \quad (10)$$

$$x_1 \text{ ist Minimum, wenn: } Q_1 > x_1 \geq Q_1 - 1,5(Q_2 - Q_1) \quad (11)$$

Wenn diese Einschränkungen nicht erfüllt werden, werden die Werte $x_{(a)}$ und x_1 als Ausreißer definiert und die nachfolgenden Messwerte auf Übereinstimmung mit den Kriterien in Gleichung 10 und Gleichung 11 überprüft.

Die statistische Auswertung mittels Boxplot wurde ausschließlich für die Auswertung der Zugversuche an Garnen und Seilen herangezogen, da die Losgröße der Stichproben bei den Garnabrazionsversuchen bei den Dauerbiegeversuchen mit $a = 5$ deutlich zu klein ist, um sinnvolle Boxplots zu erzeugen, da die Spannweite R dann aus nur 3 Messwerten bestimmt wird.

¹¹ Es wird hier auf die Variable a statt der in Abbildung 23 und [Sac07] verwendeten Variable n für die Anzahl der Messwerte zurückgegriffen, um Verwechslungen mit dem Formelzeichen n der Stoffmenge (vgl. Kapitel 2.3.6) vorzubeugen.

3.4 Versuchsplan

In diesem Kapitel ist zusammenfassend der Versuchsplan (vgl. Tab. 14), nach Relevanz für die Ergebnisse sortiert, dokumentiert. Die Versuche an Garnen und Seilen wurden, soweit möglich, parallel durchgeführt.

Tabelle 14: tabellarischer Versuchsplan

Nr.	Art der Prüfung	Norm	Art und Anzahl der Proben	Ermittelter Kennwert	Relevanz für die Untersuchungen
1	Zugversuch	ISO 2062	Garn; 10 pro Fasertyp	Bruchkraft F_B	Berechnung der Zugfestigkeit
2	Dichtebestimmung	ASTM D 3800	Garn; 4 pro Faser-typ	Dichte ρ	Berechnung der Zugfestigkeit
3	Garnabrasionsversuche	ASTM D 6611	Litze; 2 pro Fasertyp	Bruchzyklenzahl N_G	Abschätzung der Lebensdauer im Dauerbiegeversuch
4	Bestimmung der Verteilung der Molmasse	-	Garn; 2 pro Fasertyp	Gewichtsmittel \bar{M}_w und Zahlenmittel \bar{M}_n der Molmasse	Berechnung des Polydispersitätsindex PDI zur Verifizierung der 1. These
5	Dynamische Differenzkalorimetrie (DSC)	ISO 11357	Garn; 1 pro Fasertyp	Schmelzenthalpie ΔH_f	Ermittlung der Verarbeitungstemperaturen zum Thermofixieren; Verifizierung der 2. These
6	Prüfung der Geometrie	ISO 2307	Seil; 1 pro Fasertyp	Seilfeinheit ρ_1	Berechnung der Bruchspannung der Seile
7	Zugversuch	ISO 2307	Seil; min. 5 pro Fasertyp	Bruchkraft F_B	Berechnung der Bruchspannung der Seile

8	Dauerbiegeversuche	VDI 2358	Seil; 5 pro Fasertyp und Prüfparameter	Bruchbiegewechselzahl N	Ermittlung der Leistungsfähigkeit in Anwendungen mit Biegebelastung
9	Thermofixierversuche		Seil; 35 m pro Fasertyp und Temperatur		Ermittlung der Festigkeitssteigerung durch Thermofixieren
10	Zugversuch	ISO 2307	Seil, thermofixiert; min. 4 pro Fasertyp und Fixiertemperatur	Bruchkraft F_B	Berechnung der Bruchspannung der Seile nach dem Thermofixieren; Ermitteln der Festigkeitssteigerung
11	Prüfung der Geometrie	ISO 2307	Seil, thermofixiert; 1 pro Fasertyp	Seilfeinheit ρ_1	Berechnung der Bruchspannung der Seile nach dem Thermofixieren
12	Dichtebestimmung	ASTM D 3800	Garn aus thermofixiertem Seil; 4 pro Fasertyp	Dichte ρ	Berechnung der Zugfestigkeit der Seile nach dem Thermofixieren

4 Ergebnisse und Bewertung

In diesem Kapitel werden die aus den in Kapitel 3 beschriebenen, durchgeführten Versuchen erhaltenen Ergebnisse dargestellt und ihre Bedeutung bzw. Aussagekraft für die Untersuchungen bewertet. Dabei werden die Ergebnisse nach Versuchen an Garnen und Versuchen an Seilen getrennt bewertet.

4.1 Eigenschaften der Garne aus UHME Polyethylen

4.1.1 Zugfestigkeit

Die Untersuchung der Garne wurde mit Zugversuchen nach DIN EN ISO 2062 (vgl. Kap. 3.3.1) begonnen. Dabei wurden 10 Proben von jedem Fasertyp geprüft. Wegen der leicht unterschiedlichen Kennwerte der angelieferten Multifilamentgarne hinsichtlich Garntiter und Dichte (vgl. Kapitel 3.1), ist ein direkter Vergleich der gemessenen Kräfte nicht sinnvoll. Daher wurde die Dichte der Fasern bestimmt (vgl. Kapitel 3.3.2), um eine Umrechnung der Kräfte auf Bruchspannungen zu erreichen. Die Mittelwerte der Dichten der einzelnen Werkstoffe sind in Tabelle 14 dargestellt. Der Wert für die Dichte der Faser Dyneema® SK75 wurde aus einer wissenschaftlichen Veröffentlichung aus dem Institut für Fördertechnik und Kunststoffe übernommen. Die mathematischen Zusammenhänge zwischen Dichte ρ , Masse m und Volumen V (vgl. Gleichung 12) bzw. Masse m , Länge l und dem Garntiter T_t (vgl. Gleichung 13) ermöglichen die Berechnung der theoretischen tragenden Ersatzquerschnitte A_{Eg} der Garne nach Gleichung 14, wie folgt:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{A \cdot l} \quad (12)$$

$$T_t = \frac{m}{l} \quad (13)$$

$$A_{Eg} = \frac{T_t}{\rho} \quad (14)$$

Die Werte der Garntiter wurden aus den Datenblättern übertragen und als korrekt angenommen. Die berechneten Ersatzquerschnitte sind, zusammen mit den Kennwerten des Garntiters und der Dichte in Tabelle 15 eingefügt.

Eine auffallend niedrige, gemessene Dichte der Eosten®-Faser ($\rho_{Eosten} = 0,899 \text{ g/cm}^3$) lässt vermuten, dass das Messergebnis durch die Faserschlichte verfälscht wurde. Da im Datenblatt eine Dichte für Eosten FT093 mit $\rho = 0,97 \text{ g/cm}^3$ angegeben wird, wurde als Kennwert für weitere Berechnungen der Mittelwert zwischen der Messung und dem Datenblatt mit $\rho_{EosMittel} = 0,9345 \text{ g/cm}^3$ angenommen (vgl. Tab. 15). Das Thema Faserschlichte wird später erneut aufgegriffen und weiter verfolgt.

Tabelle 15: Dichte und Ersatzquerschnitt der untersuchten Garne aus UHMW Polyethylenfasern

Werkstoff	Garntiter T_t [dtex]	Dichte ρ [g/cm ³]	Ersatzquerschnitt A_{Eg} [mm ²]
Dyneema® SK75	1760	0,975 (übernommen aus [Hei13])	0,1805
Spectra® S1000	1778	0,9671	0,1839
TNX®	1780	0,9842	0,1809
Eosten® FT093	1760	0,9345 (Mittelwert aus Messung und Datenblatt])	0,1883

Aus den errechneten Ersatzquerschnitten (vgl. Tab. 15) und den Werten der Höchstzugkräfte der Garne aus den Zugversuchen wurden Zugfestigkeiten errechnet. Abbildung 29 zeigt im Vergleich die Zugfestigkeiten der einzelnen Garntypen.

Vergleicht man die Medianwerte in den Boxplots in Abbildung 29 mit den Angaben in den Datenblättern zu den jeweiligen Fasern, ist ersichtlich, dass die rechnerisch bestimmten Zugfestigkeiten unterhalb der Herstellerangaben liegen (vgl. Kap. 3.1, Tabelle 6). Während bei den Fasern Dyneema® SK75 und TNX® selbst die errechneten Maximalwerte etwas unter den Angaben im Datenblatt liegen, können die Werte aus den Datenblättern bei den Fasern Eosten® FT093 und Spectra® S1000 zumindest mit den Maximalwerten erreicht bzw. leicht übertroffen werden. Worin dieser Umstand begründet ist, lässt sich ohne genaue Kenntnis der Prüfparameter bei den seitens der Hersteller durchgeführten Zugprüfungen nicht klären, da bereits die Prüfgeschwindigkeit einen großen Einfluss auf die Prüfergebnisse hat [Bar05], und DIN EN ISO 2062 verschiedene Prüfgeschwindigkeiten zwischen 250 mm/min und 5000 mm/min zulässt.

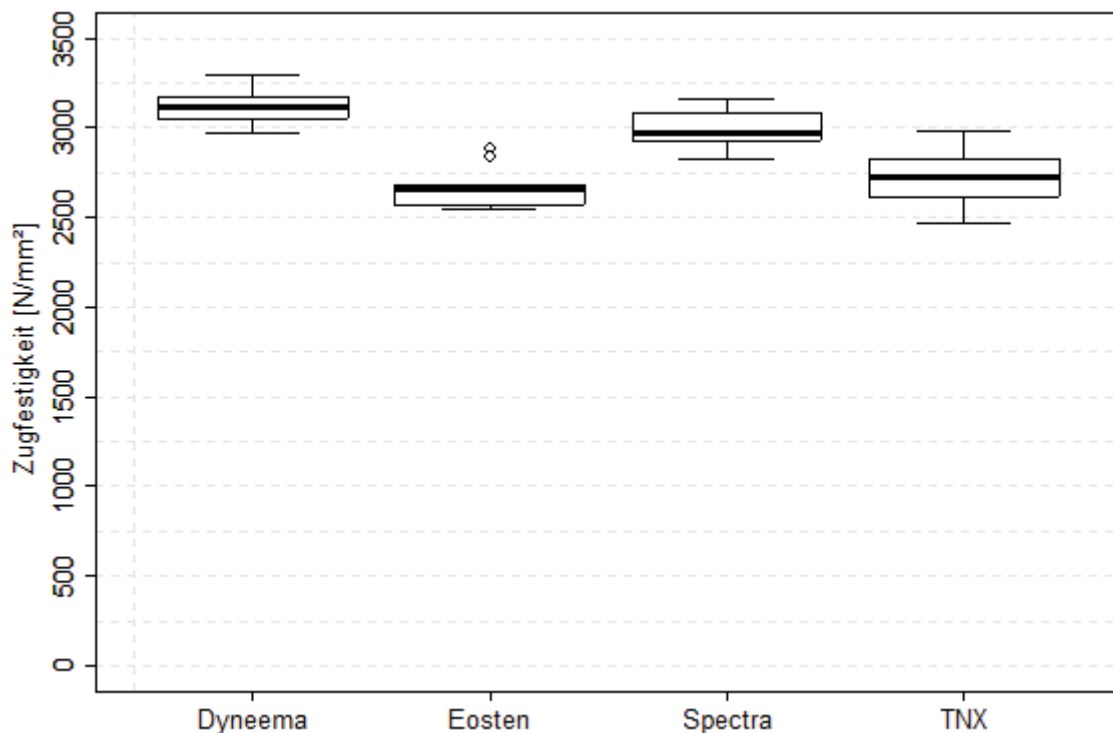


Abbildung 29: Zugfestigkeiten der untersuchten Garne

Eine Prüfung am Einzelfilament wird im Zugversuch ebenfalls höhere Werte der Zugfestigkeit liefern, da dort die bei der Prüfung nach DIN EN ISO 2062 zwischen den Garnen auftretenden, kontaktbedingten Querbelastungen nicht auftreten, und durch den deutlich geringeren Querschnitt die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins einer Fehlerstelle im Material deutlich kleiner ist. Zusätzlich haben die für die Berechnung der Zugfestigkeit verwendeten Werte der Dichte Einfluss auf das Ergebnis.

Beim Vergleich der Ergebnisse untereinander, fällt die deutlich größere Spannweite R (vgl. Kapitel 3.3.9) im Boxplot für den Faserwerkstoff TNX® auf. Da die verwendeten 10 Proben etwas unter den für eine statistische Auswertung empfohlenen 12 Proben (vgl. Kapitel 3.3.9) liegen, wurden weitere 40 Proben der Faser TNX® im Zugversuch geprüft. Dabei wurde so vorgegangen, dass 10 Proben des Garnes von der Spule als Probe entnommen wurden. Die folgenden 5 Meter auf der Garnspule wurden entfernt und aus dem nachfolgenden Bereich wurden weitere 10 Proben entnommen. Dies wurde wiederholt, bis 40 zusätzliche Proben für weitere Zugversuche vorhanden waren. Aus den Bruchkräften im Zugversuch wurden auch in diesem Fall wieder Zugfestigkeiten berechnet und in einem Diagramm den Werten der anderen

Materialien aus den ersten Zugversuchen gegenüber gestellt. Bei gleichmäßigen Eigenschaften über die gesamte Garmlänge wäre zu erwarten gewesen, dass sich sowohl die Spannweite des Boxplots als auch der Medianwert nicht stark ändern. Entgegen dieser Erwartung wurde festgestellt, dass der Medianwert der Zugfestigkeit leicht anstieg, wobei gleichzeitig eine starke Erhöhung der Spannweite auftrat. Außerdem zeigte eine einzelne Probe eine sehr geringe Zugfestigkeit von $R_m = 1505 \text{ N/mm}^2$, was ungefähr 55% des Medianwertes (Abb. 30) beträgt.

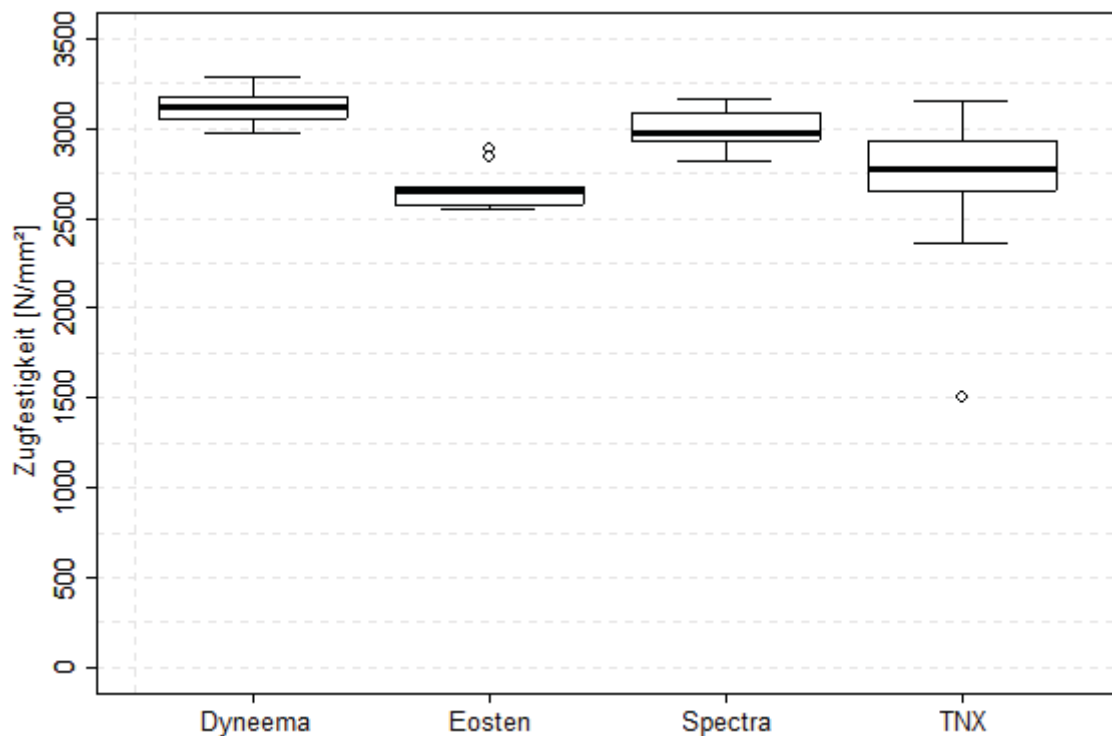


Abbildung 30: Zugfestigkeiten der untersuchten Garne mit erhöhter Probenanzahl für TNX®

Zusammenfassend wird deutlich, dass die Angaben für die Festigkeit der Fasern aus den Datenblättern nicht bestätigt werden konnten. Nach den Angaben aus den Datenblättern würde Dyneema® SK 75 die höchste Festigkeit aufweisen, gefolgt von TNX®, Spectra® S1000 und Eosten® FT093. In den hier dargestellten Messungen zeigte sich eine abweichende Reihenfolge, bei der Dyneema® SK 75 vor Spectra® S1000, TNX® und Eosten® FT093 die höchste Festigkeit aufweist. Ohne eine Angabe der Prüfnorm und der Prüfumgebung können die Festigkeitskennwerte aus den Datenblättern nicht als vertrauenswürdige Grundlage zur Auslegung von Seilen genutzt werden.

4.1.2 Abrasionsbeständigkeit

Die Garnabrazionsversuche nach ASTM D 6611 (vgl. Kap. 3.3.3) wurden mit gezwirnten Litzen, wie sie zur Herstellung der im Weiteren untersuchten Seile dienten, durchgeführt. Um geeignete Gewichte für die Belastung zu finden, waren im Vorfeld der Versuche folgende Aspekte zu betrachten:

In der Literatur wird für UHMW-Polyethylenfasern vom Typ Dyneema® SK75 gezeigt, dass Zwirne aus Dyneema® SK75 bei einem Verdrehwinkel von 6° (entspricht der Zwirnrate von 25,8/m) eine etwa 5% niedrigere Festigkeit aufweisen, als unverdrehte Garne mit der gleichen Anzahl identischer Filamente [Hei13]. Da die Garne für die Seilherstellung unter einer Zwirnrate von 25,8/m zu einer Litze gezwirnt wurden, wurde eine theoretische Zugfestigkeit R_{Litze} für die Litzen nach Gleichung 15 errechnet:

$$R_{Litze} = R_{Garn} \cdot f_{Zwirn} \quad (15)$$

Dabei bezeichnet R_{Garn} den Medianwert der Zugfestigkeit der einzelnen Garne (vgl. Abbildung 30). Der Zwirnfaktor f_{Zwirn} wird hier, wegen der durch das Zwirnen verringerten Zugfestigkeit, mit $f_{Zwirn} = 0,95$ festgesetzt. In Tabelle 16 sind die errechneten Werte der theoretischen Zugfestigkeiten aufgeführt. Die in [Hei13] genannten Werte für die Festigkeit gezwirnter Garne bestätigen die Richtigkeit der theoretischen Berechnung für den Werkstoff Dyneema® SK75.

Tabelle 16: Theoretische Zugfestigkeiten der Litzen aus UHMW Polyethylenfasern

Werkstoff	Garnzugfestigkeit R_{Garn} [N/mm ²]	Theoretische Litzenzugfestigkeit R_{Litze} [N/mm ²]
Dyneema® SK75	3125	2969
Spectra® S1000	2947	2800
TNX®	2778	2639
Eosten® FT093	2654	2521

Unter der Annahme, dass sich der Ersatzquerschnitt A_{EL} der Litzen durch das Zusammenführen von 7 Garnen zu $A_{EL} = 7 \cdot A_{Eg}$ (vgl. Werte A_{Eg} in Tab. 15) ergibt, kann davon ausgegangen werden, dass die applizierten Gewichte der Masse $m = 3500$ g (Gewichtskraft von rund 34,335 N, bei Fallbeschleunigung $g = 9,81$ m/s²) eine Zugspannung von $25,05 \leq \sigma_z \leq 27,19$ N/mm² erzeugen. Das entspricht einer Belastung der Litzen von etwa 0,92% – 1,08% der theoretischen Litzenzugfestigkeit R_{Litze} , und erfüllt damit gerade noch die Anforderungen der Norm ASTM D 6611.

Die Garnabrasionsversuche an den Litzen wurden bis zum Bruch der Litzen ausgeführt und die Zyklenzahlen bis Bruch notiert, wobei jeweils 5 Proben geprüft wurden. Die 4 Prüfplätze wurden jeweils mit einem anderen Fasertyp bestückt, um Einflüsse von Schwankungen im Raumklima zwischen den einzelnen Versuchsdurchgängen möglichst gering zu halten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Faser Dyneema® SK75 im Garnabrasionsversuch nach ASTM D 6611 die niedrigsten Bruchzyklenzahlen aufweist (vgl. Abb. 31).

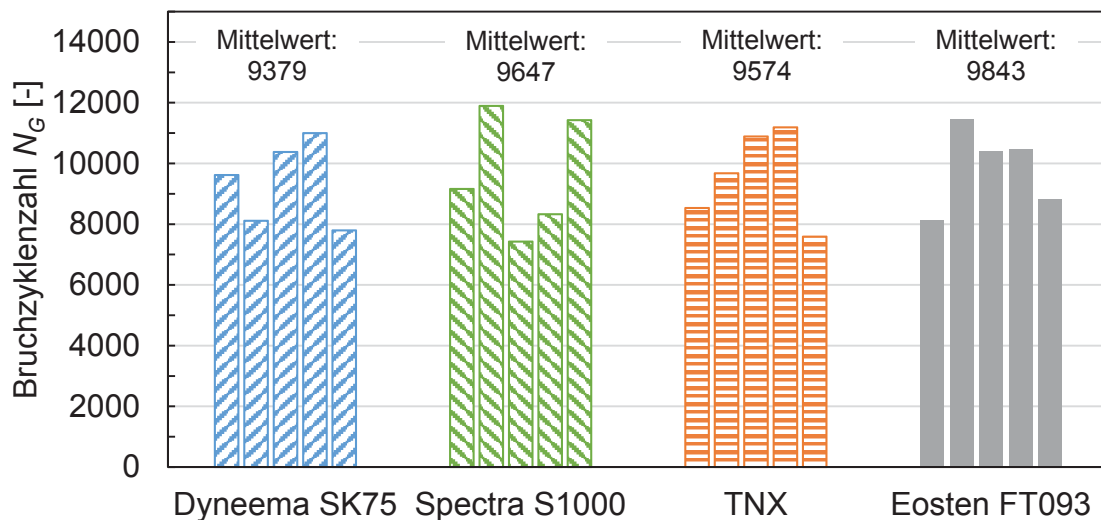


Abbildung 31: Bruchzyklenzahlen der Litzen aus UHMW Polyethylen im Garnabrasionsversuch nach ASTM D 6611

Aus den Werten der Zugfestigkeit der Garne lassen sich, in Verbindung mit den Bruchzyklenzahlen aus der Garnabrasionsprüfung nach ASTM D 6611, für die im Folgenden zu prüfenden Seile folgende Prognosen definieren:

Die Festigkeit der Seile aus Spectra® S1000 ist als geringer (ca. 5%) als die Festigkeit der Seile aus Dyneema® SK75 zu erwarten, die Festigkeit der Seile aus TNX® und Eosten® FT093 müsste signifikant niedriger (12% - 18%) liegen. Die Einzelwerte der Festigkeitsbestimmung werden bei der Faser Dyneema® SK75 in einem kleinen Intervall um das Mittel variieren.

In den Dauerbiegeversuchen an Seilen ist zu erwarten, dass die Faser Dyneema® SK75 die geringsten Bruchbiegewechselzahlen aufweisen wird.

4.1.3 Morphologie

Die durchgeführte Bestimmung der Molmasseverteilung der Fasern dient dazu, die in Kapitel 2.6 gestellte These der Abschätzbarkeit der Varianz der Festigkeitsbestimmung aus dem Polydispersitätsindex zu prüfen und deren Wahrheitsgehalt zu ermitteln.

Die Werte der Molmasse wurden als Gewichtsmittel und Zahlenmittel über eine Hochtemperatur-GPC bestimmt und daraus der Polydispersitätsindex (vgl. Kap. 3.3.4) errechnet. In Tabelle 17 sind die Gewichts- und Zahlenmittel der Molmasse aus jeweils 2 Messungen für die einzelnen Fasertypen, sowie die daraus errechneten Werte des PDI aufgezeigt. Die Proben für die Messungen wurden dabei vorsorglich von 2 verschiedenen Spulen des jeweiligen Garnes entnommen, um zu prüfen, ob eventuell schon in den zur Faserherstellung verwendeten Polymeren Eigenschaftsunterschiede festzustellen sind.

Tabelle 17: Werte der Molmasse der Fasertypen aus der Hochtemperatur-GPC

Werkstoff	Gewichtsmittel der Molmasse \bar{M}_w [g/mol]	Zahlenmittel der Molmasse \bar{M}_n [g/mol]	Polydispersi- tätsindex PDI [-]	Varianz der Bruchkraft $Var(F_B)$ [%]
Dyneema®	627000	293000	2,14	3,11
SK75	450000	186000	2,42	
Spectra®	688000	269000	2,56	3,7
S1000	2230000	586000	3,80	
TNX®	622000	266000	2,34	9,05
	2800000	660000	4,24	
Eosten®	734000	314000	2,34	4,19
FT093	620000	233000	2,66	

Wie aus den Werten für den Polydispersitätsindex, sowie der Gewichts- und Zahlenmittel der Molmasse, in Tabelle 17 erkennbar ist, unterliegen schon die Polymergranulate, welche als Ausgangsstoffe zur Faserherstellung dienen, größeren Schwankungen bezüglich ihrer Molmasse, was sich auf die Eigenschaften der Fasern auswirken muss.

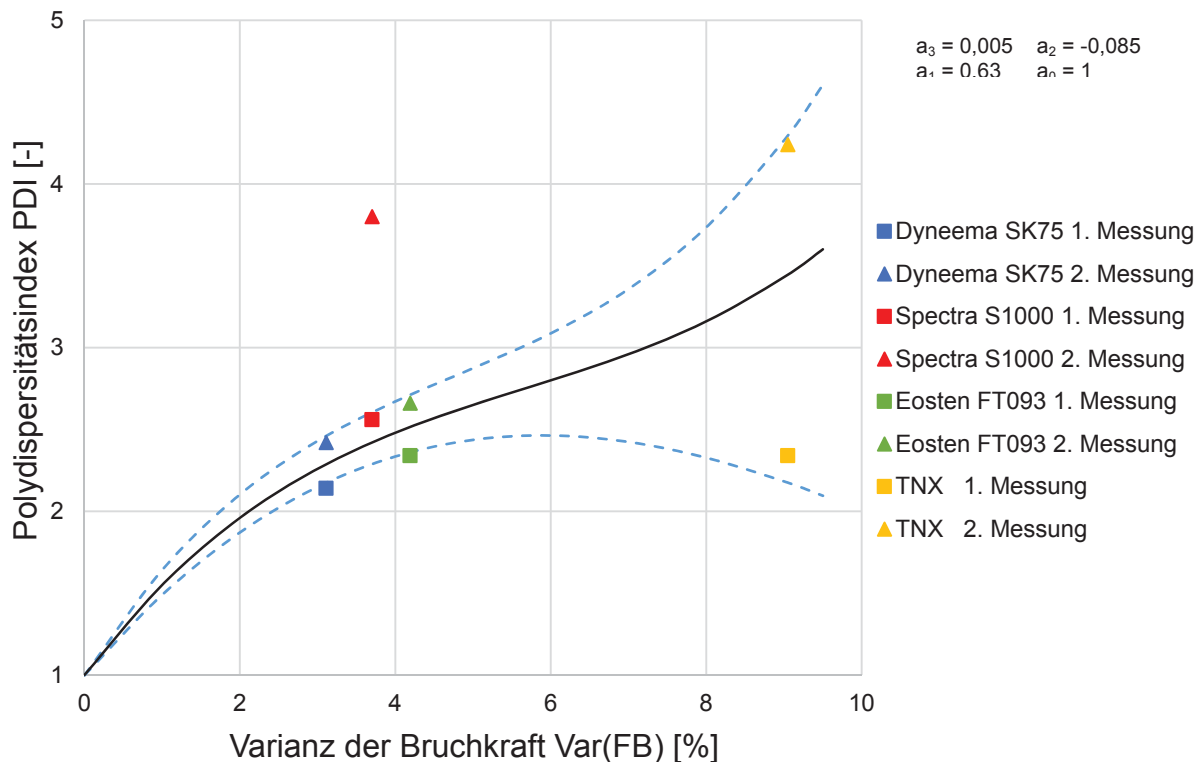


Abbildung 32: Molmasseverteilung der UHMW Polyethylenfasern aus der GPC-Analyse

Es ist weiterhin eindeutig erkennbar, dass die Werkstoffe, die bei der Zugprüfung eine große Varianz in den Messwerten zeigten, auch einen höheren Polydispersitätsindex aufweisen. Geht man weiterhin davon aus, dass bei einem Wert von $PDI = 1$ für den Polydispersitätsindex, welcher das Vorhandensein nur einer einzelnen Molekülfraktion beschreibt, theoretisch keine Varianz in den Werten der Zugfestigkeit vorhanden sein sollte, ergibt sich die in Abbildung 32 dargestellte Kurve, welche die sich einstellende Varianz der Bruchkraft bei Zugversuchen an Garnen aus UHMW Polyethylen bei bekanntem PDI beschreibt. Die punktierten Kurven beschreiben das Vertrauensintervall für eine Vorhersage der zu erwartenden Varianz der Bruchkraft. Damit hat sich die in Kapitel 2.6 gestellte These, dass man aus der Verteilung der Molmasse auf die Varianz der einzelnen Festigkeitswerte bei der Zugprüfung schließen kann, bewahrheitet. Mittels Überprüfung an weiteren Fasermaterialien aus UHMW Polyethylen anderer Hersteller könnte die These so verfeinert werden, dass allgemeine Abschätzungen für beliebige Fasern aus UHMW Polyethylen ermöglicht werden.

Untermauert werden kann die Korrektheit der These zusätzlich mit veröffentlichten Erkenntnissen derart, dass gezeigt wurde, dass der optimale Reckgrad bei der Faserherstellung für verschiedene Molmassen unterschiedlich hoch ist [Bön86]. Folgt man dieser Erkenntnis, haben die Verarbeitungsparameter im Verstreckprozess auf unterschiedlich große Moleküle (mit unterschiedlichen Gyrationenradien; vgl. Kap. 2.6) unterschiedliche Auswirkungen auf die Orientierung in den Bereichen, wo sich Moleküle mit niedrigerer Molmasse anhäufen. So wird ein Verstreckprozess mit konstantem Reckgrad dazu führen, dass lokale Unterschiede in der Molmasse der beeinflussten Molekülketten lokale Festigkeitsunterschiede erzeugen. Bei einem Garn, welches eine Ansammlung einer Menge an Filamenten mit solchen lokalen Schwankungen in der Festigkeit ist, wird sich dieser Umstand in einer ausgeprägten Varianz der Festigkeitswerte äußern.

Aus den durch die durchgeführten DSC-Analysen gewonnenen DSC-Kurven, speziell aus den in der ersten Aufheizphase bestimmten Werten der Schmelzenthalpie ΔH_f , kann die Kristallinität α von polymeren Werkstoffen über Gleichung 16 abgeschätzt werden (vgl. Kap.3.3.5).

$$\alpha = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_{f100\%}} \quad (16)$$

Die Werte der spezifischen Schmelzenthalpien der Fasern sowie die errechneten Kristallisationsgrade sind in Tabelle 18 gezeigt.

Tabelle 18: Spezifische Schmelzenthalpien und Orientierungsgrade der untersuchten Fasern

Werkstoff	Schmelzenthalpie der Faser ΔH_f [J/g]	Kristallisationsgrad der Faser α [%]
Dyneema® SK75	261,95	90,33
Spectra® S1000	260,89	89,96
TNX®	254,41	87,73
Eosten® FT093	252,89	87,2

Es ist bekannt, dass die Festigkeit von Polymeren mit steigendem Kristallisationsgrad zunimmt [Bön86] [Dom05] [Hea01]. Daher sollten die Fasern mit höherem Kristallisationsgrad die höchsten Festigkeiten zeigen. Vergleicht man die Werte der Zugfestigkeiten der Fasern in Abbildung 30 mit den Werten der Schmelzenthalpie in Tabelle 18, so werden diese Angaben für die untersuchten Fasern bestätigt.

Trägt man die Medianwerte der Zugfestigkeit der Garne aus Abbildung 30 über der zugehörigen Schmelzenthalpie ab, ergibt sich eine Möglichkeit der quantitativen Abschätzung der Beziehung zwischen Festigkeit und Schmelzenthalpie.

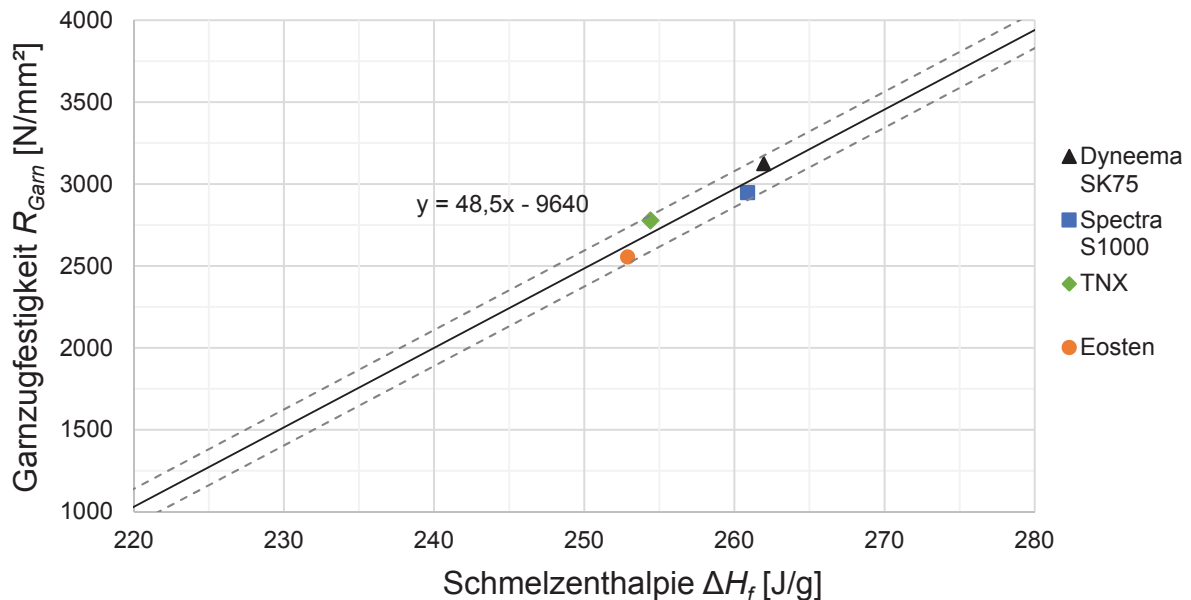


Abbildung 33: Abschätzung der Beziehung zwischen Festigkeit und Schmelzenthalpie

Die in Abbildung 33 dargestellte Funktion beschreibt eine Trendlinie, in die Datenpunkte im Zugfestigkeits-Schmelzenthalpie-Diagramm eingefügt werden kann, und die Zusammenhänge zwischen Festigkeit und Schmelzenthalpie mit einer Genauigkeit von $\pm 100 \text{ N/mm}^2$ darstellt.

Da in der Stiftungsprofessur technische Textilien – Textile Maschinenelemente am Institut für Fördertechnik und Kunststoffe im Rahmen der laufenden Forschungstätigkeit inzwischen weitere Fasern aus UHMW Polyethylen untersucht werden, wurden die Schmelzenthalpien aus DSC-Kurven von anderen Fasern aus UHMW Polyethylen herangezogen. Aus diesen Werten der Schmelzenthalpie wurden nach Gleichung 17 theoretische Zugfestigkeiten R_{theor} bestimmt und mit den realen vorliegenden Zugfestigkeiten verglichen (vgl. Tab. 19).

$$R_{theor} = \left(\frac{97 \text{ g}}{2 \text{ J}} \Delta H_f - 9640 \right) \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad (17)$$

Tabelle 19: Rechnerische und reale Zugfestigkeit von UHMW Polyethylen-Fasern im Vergleich

Bezeichnung der Faser	Schmelzenthalpie ΔH_f [J/g]	theoretische Zugfestigkeit R_{theor} [N/mm ²]	reale Zugfestigkeit R_m [N/mm ²]
B16	258,4	2892	2808
	267,0	3309	
D15	237,6	1883	2298
	251,8	2572	
H16	263,9	3159	2820
	274,7	3682	

Dabei zeigte sich, dass die rechnerisch abgeschätzten Festigkeiten die Werte aus den Zugversuchen nicht mit ausreichender Genauigkeit widerspiegeln. Bei der Faser B16 werden durch die Rechnung nach Gleichung 17 Werte erreicht, die 3% bis 18% oberhalb der in Messungen bestimmten Zugfestigkeit liegen. Bei der Faser D15 ist der Wert der experimentell bestimmten Zugfestigkeit zwischen den Werten der Schätzung nach Gleichung 17 angesiedelt, jedoch ist die Abweichung zwischen theoretischer Schätzung und experimentell bestimmten Werten mit ca. $\pm 10\%$ sehr hoch. Bei der Faser H16 sind die theoretisch abgeschätzten Werte etwa 13% bis 30% höher als die durch Experimente ermittelte Festigkeit.

Die vermutete Kennlinie, die mit im Rahmen dieser Arbeit ermittelten Kennwerten zu den untersuchten Fasern entwickelt wurde, lässt sich nicht mit ausreichender Genauigkeit auf andere Fasern aus UHMW Polyethylen übertragen. Eine quantitative Abschätzung der Festigkeit der Fasern aus der Schmelzenthalpie lässt sich ebenfalls nicht ableiten. Damit kann die These, dass man aus der Schmelzenthalpie direkt auf die Zugfestigkeit von Fasern aus UHMW Polyethylen schließen kann, nicht bewiesen werden.

4.2 Eigenschaften der Seile

4.2.1 Geometrische Eigenschaften

Die Fertigung der Seile lief weitestgehend ohne Probleme ab. Lediglich bei den Garnen aus dem Fasertyp Eosten® zeigten sich vereinzelt Probleme bei der Fertigung. Durch in den Garnen vorhandene Fehler und Garnspleiße traten Probleme bei der Zwirnherstellung auf. An den Fehlstellen der Garne brachen einzelne Filamente und verursachten Störungen beim Fachen und Zwirnen (vgl. Abb. 34).



Abbildung 34: Fehler in einem Eosten®-Garn

Die Garnspleiße (vgl. Abb. 35), welche optisch kaum erkennbar waren, brachen durch die beim Zwirnen nötige Zugspannung im Zwirn während der Zwirnherstellung, wobei der Bruch noch vor dem Einlauf in die Zwirnmaschine erfolgte. Solche Fehlstellen und Spleiße wirken sich, zusätzlich zu einem großen PDI, negativ auf die Varianz der Festigkeitswerte aus, da die Fehlstellen, die während der Seilherstellung nicht bemerkt wurden, die Festigkeit der Seile negativ beeinflussen können.



Abbildung 35: Gebrochener Garnspleiß in einem Eosten®-Garn

In den wenigen Fällen, wo während der Seilfertigung Störungen durch Garnfehler auftraten, wurden die Garne neu verbunden und die Fehlstellen im Seil markiert. Zur Prüfung der Eigenschaften der Seile wurden die Muster so entnommen, dass der Abstand zur bekannten Fehlstelle mindestens 1 Meter betrug, um Auswirkungen der bekannten Fehlstellen auf die Ergebnisse der Prüfung ausschließen zu können.

Die Seile wurden in der TU Chemnitz gefertigt und weichen in ihren Eigenschaften nur leicht von den Vorgaben ab. Es wurden Zwirnraten von 25,8/m und Flechtlängen zwischen 39,5 mm und 40,0 mm realisiert. Literatur zu Faserseilen beschreibt, dass ein Einfluss der Flechtlänge auf die Festigkeit vorhanden ist [Hea01], jedoch ist die Abweichung vom Vorgabewert $l_p = 39$ mm sehr klein (ca. 1,3% - 2,6%) und der Einfluss damit vernachlässigbar.

Die Seilfeinheiten ρ_1 zeigten erwartungsgemäß leichte Unterschiede, da die Garntiter der einzelnen Garntypen unterschiedlich waren, jedoch alle Seile nach einer einheitlichen Seilkonstruktion (vgl. Kapitel 3.1.2) gefertigt wurden. Tabelle 20 zeigt die Längen der Seilmuster sowie die zugehörigen Massen und Seilfeinheiten im Überblick. Beim Vergleich der Werte der Seilfeinheit in Tabelle 20 mit den Werten der Garnfeinheiten (Kapitel 3.1.1, Tabelle 6) zeigt sich, dass die Unterschiede in den Seilfeinheiten nicht mit den Unterschieden der Garnfeinheit übereinstimmen.

Tabelle 20: Seilfeinheiten der gefertigten Seile aus UHMW Polyethylen-Fasern

Werkstoff	Dyneema® SK75	Spectra® S1000	TNX®	Eoston® FT093
Probenlänge [m]	5,535	2,016	2,017	2,012
Masse der Probe [g]	90,7	32,9	33,9	33,3
Seilfeinheit ρ_1 [ktex]	16,39	16,32	16,81	16,55

Unterschiede in der Fertigungsqualität können ausgeschlossen werden, da zwischen den einzelnen Seilchargen keine Unterschiede bezüglich der Festigkeitseigenschaften ermittelt werden konnten. Bei Polymerfasern erfolgt die Bestimmung der Garnfeinheit seitens der Hersteller im Regelfall vor dem Auftragen der Faserschlichte. Da Schlichteanteile zwischen 1% und 5% (jeweils massebezogen) durchaus üblich sind [Hea01] [McK04], und der genaue Schlichteanteil von den Faserherstellern nicht veröffentlicht wird, ist ein direkter Vergleich zwischen Seilfeinheit und Faserfeinheit nicht möglich.

4.2.2 Festigkeitseigenschaften

Die Zugversuche zur Ermittlung der Festigkeit der Seile mit dem Nenndurchmesser $d_N = 6 \text{ mm}$ wurden nach DIN EN ISO 2307 (vgl. auch Kapitel 3.3.6) durchgeführt. Ähnlich wie bei den Garnen, ist die absolute Bruchkraft der Seile jedoch nicht vergleichbar, da die Seile geringe Unterschiede in den Seilfeinheiten aufweisen. Im Zusammenspiel mit der variierenden Dichte der Fasern ergibt sich ein Einfluss auf den tragenden Querschnitt der Seile, weshalb hier, in Analogie zum Ersatzquerschnitt der Garne, ein Ersatzquerschnitt A_{ES} für die Seile errechnet wurde (vgl. Gleichung 18), um Vergleiche zwischen den Seilen aus verschiedenen Fasertypen zu ermöglichen.

$$A_{ES} = \frac{\rho_1}{\rho} \quad (18)$$

Aus den so ermittelten Ersatzquerschnitten A_{ES} der Seile und den in den Zugversuchen bestimmten Werten der Bruchkraft F_B , wurde im Anschluss nach Gleichung 19 die Bruchspannung σ_B der Seile berechnet. Für die Dichte ρ wurden die Werte aus Kapitel 3.2.1 übernommen.

$$\sigma_B = \frac{F_B}{A_{ES}} \quad (19)$$

Während der Seilfertigung nicht bemerkte Fehler in den Eoston® - Garnen zeigten sich in einer großen Varianz des Wertes der Bruchkraft und damit in einer großen Varianz der Bruchspannungswerte.

Vergleicht man die Bruchspannung σ_B der Seile in Abbildung 36 mit den Zugfestigkeiten der Garne (vgl. Kap. 4.1.1, Abb. 27), ist erkennbar, dass sich trotz der identischen Seilkonstruktion aus der Zugfestigkeit der Garne weder qualitativ noch quantitativ auf die Festigkeit der Seile schließen lässt. Die Mittelwerte der Bruchkräfte und die bestimmten statistischen Mittelwerte der Bruchspannungen sind in Tabelle 21 aufgeführt.

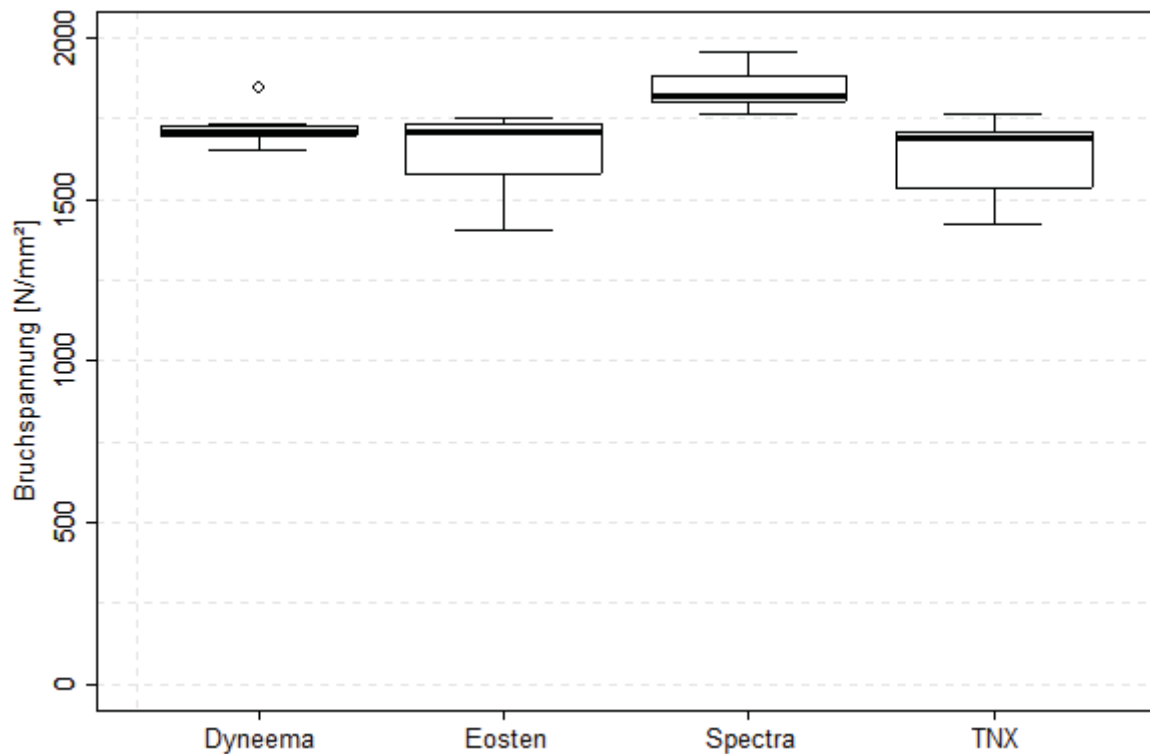


Abbildung 36: Bruchspannungen der Seile aus UHMW Polyethylen

Tabelle 21: Statistische Mittelwerte von Bruchkraft und Bruchspannung der Seile

Werkstoff	Mittlere Bruchkraft der Seile \bar{F}_B [N]	Mittlere Bruchspannung der Seile $\bar{\sigma}_B$ [N/mm²]	Relative Bruch- spannung [%]	Zugfestigkeit der Garne R_m [N/mm²]
Dyneema® SK75	28600	1701,7	100	3120
Spectra® S1000	31100	1845,7	108,5	2960
TNX®	27800	1627,6	95,6	2778
Eosten® FT093	29100	1640,7	96,4	2654

Nach den in Kapitel 4.1.1 gezeigten Ergebnissen, sollten die Seile aus der Faser Dyneema® SK75 die höchste Festigkeit zeigen, was sich durch die gezeigten Werte nicht bestätigen lässt. Im vorliegenden Fall zeigen die Seile aus Spectra® S1000 eine ca. 8,5% höhere Festigkeit als die Seile aus Dyneema SK75, gefolgt Eosten® FT093 und TNX®, wobei die Unterschiede der Medianwerte zwischen Dyneema®, Eosten® FT093 und TNX® nur minimal sind. Lediglich die Erwartung, dass die Streuung der Einzelwerte um das Mittel bei Dyneema® SK75 geringer sein müsste, wird bestätigt.

Die Ursache ist darin zu sehen, dass die Fasern durch die unterschiedlichen Herstellungsverfahren einerseits unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, andererseits sind auf die Fasern unterschiedliche Schichten appliziert, welche Einfluss auf das Verhalten in den Setzzyklen (vgl. DIN11) im Zugversuche nach DIN EN ISO 2307 und auf die Pressungsverhältnisse in den Kreuzungspunkten der Litzen sowie in den Faser-Faser-Kontakten innerhalb der Litzen und damit auf die Festigkeit haben. Das Thema der Faserschichten wird im folgenden Kapitel eingehender betrachtet. Zusammenfassend lässt sich konstatieren, dass sich aus einem Vergleich der Festigkeiten der Garne nicht auf Festigkeitsbeziehungen von identisch geflochtenen Seilen aus UHME Polyethylen-Fasern schließen lässt.

4.2.3 Verhalten unter Dauerbiegung

Aus den Festlegungen in Kapitel 3.3.7 zu den Versuchsparametern wurden die Prüfkraft $F_{Prüf}$ aus den Ersatzspannungen ($100 \text{ N/mm}^2 \leq \sigma_E \leq 300 \text{ N/mm}^2$) und den Ersatzquerschnitten A_{ES} der Seile ermittelt. In Tabelle 22 sind die Werte der absoluten und relativen Ersatzspannungen, sowie die Prüfkraft während der Dauerbiegeprüfung enthalten.

Tabelle 22: Prüfkraft der Seile für die Dauerbiegeversuche

Werkstoff	Ersatzspannung absolut $\sigma_E \text{ [N/mm}^2\text{]}$	Prüfkraft $F_{Prüf} \text{ [N]}$	Ersatzspannung relativ $\sigma_{Erel} \text{ [%]}$
Dyneema® SK75	100	1700	5,9
	200	3386	11,8
	300	5072	17,7
Spectra® S1000	100	1705	5,5
	200	3398	10,9
	300	5090	16,4
TNX®	100	1720	6,2
	200	3427	12,3
	300	5134	18,5
Eoston® FT093	100	1788	6,1
	200	3563	12,2
	300	5339	18,3

Die Werte der relativen Ersatzspannung während der Dauerbiegeprüfung zeigen, bezogen auf die relativen Ersatzspannungen, vergleichbare Belastungen der Seile aus den verschiedenen Fasertypen. Somit ist eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse gegeben.

Die Dauerbiegeversuche wurden mit der Untersuchung des Einflusses der Zugbelastung und der Biegefrequenz begonnen. Die Hublänge l_{Hub} wurde an der Prüfmaschine auf $l_{Hub} = 250$ mm eingestellt. Es wurden Biegefrequenzen von 20/min und 40/min untersucht, was bei der gewählten Hublänge l_{Hub} einer Seilgeschwindigkeit von 5 m/min bzw. 10 m/min entspricht.

Nach den in Kapitel 4.1.2 gezeigten Ergebnissen der Garnabrasionsversuche nach ASTM D 6611, war für die Dauerbiegeversuche zu erwarten, dass alle Fasern höhere Bruchbiegewechselzahlen zeigen als die Faser Dyneema® SK75. Diese Erwartung wurde durch die im Folgenden gezeigten Ergebnisse nicht bestätigt.

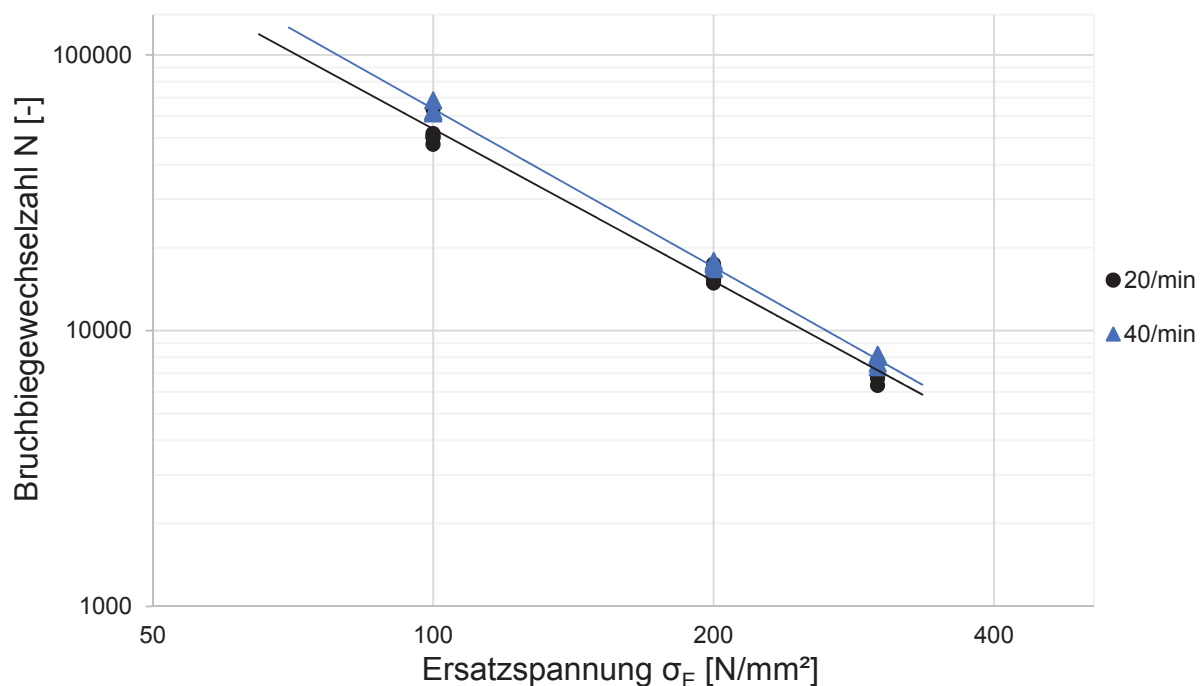


Abbildung 37: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Dyneema® SK75 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm

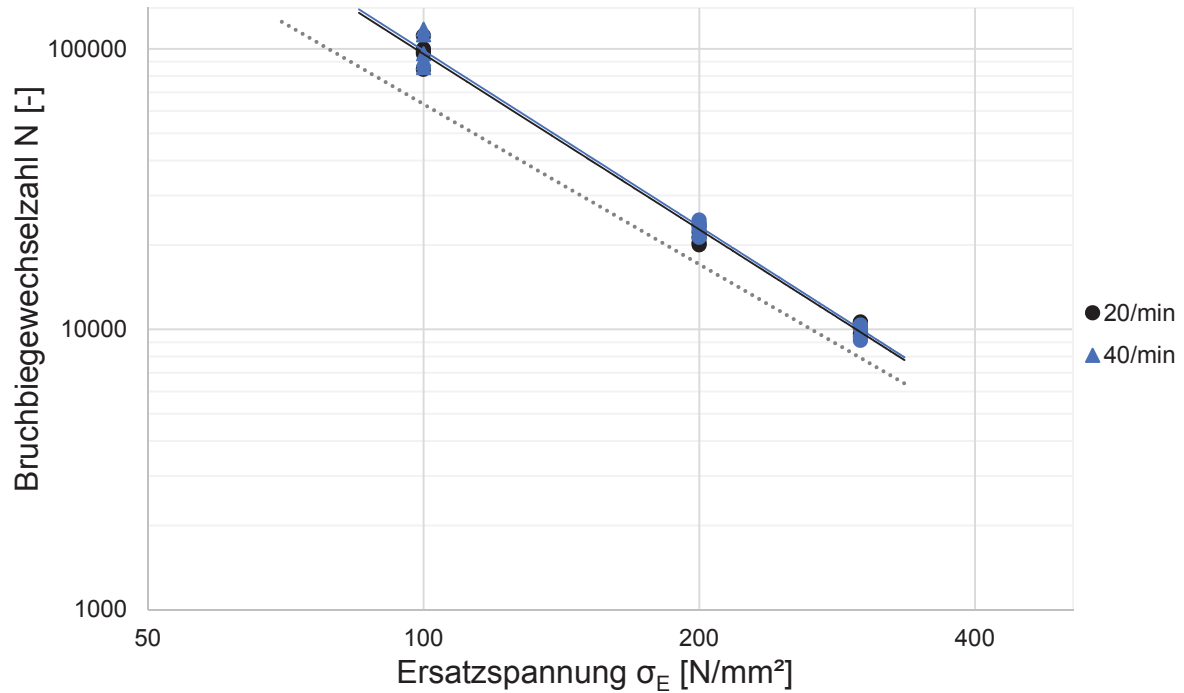


Abbildung 38: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Spectra® S1000 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm

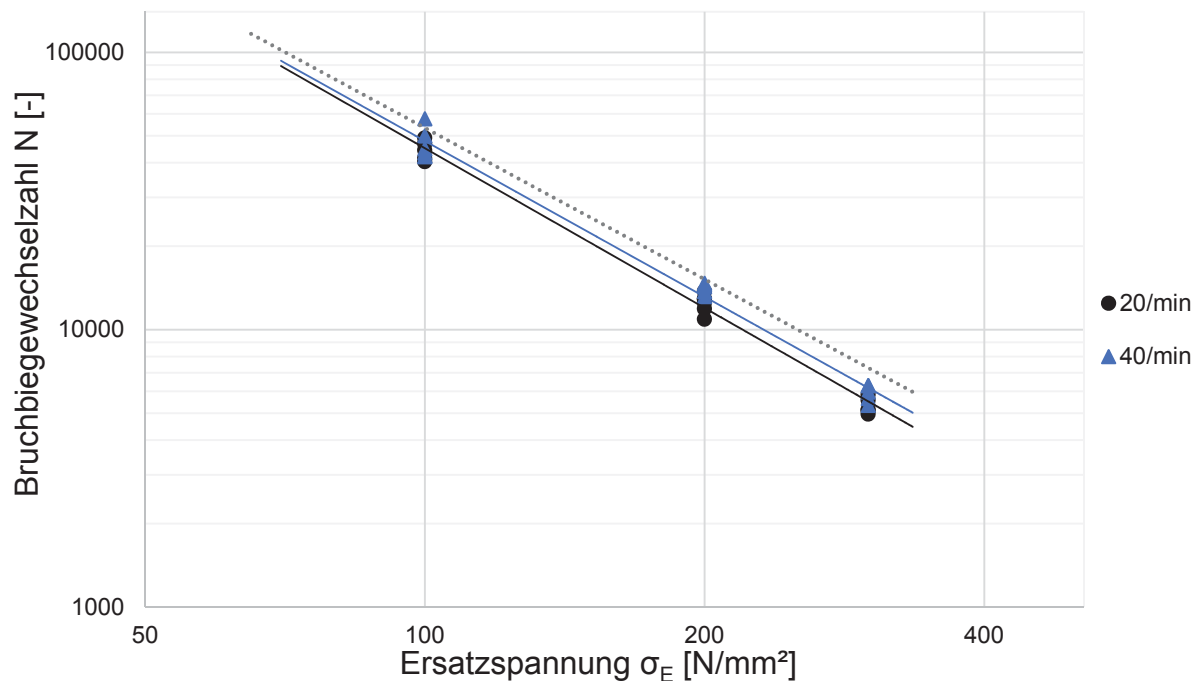


Abbildung 39: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus TNX® bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm

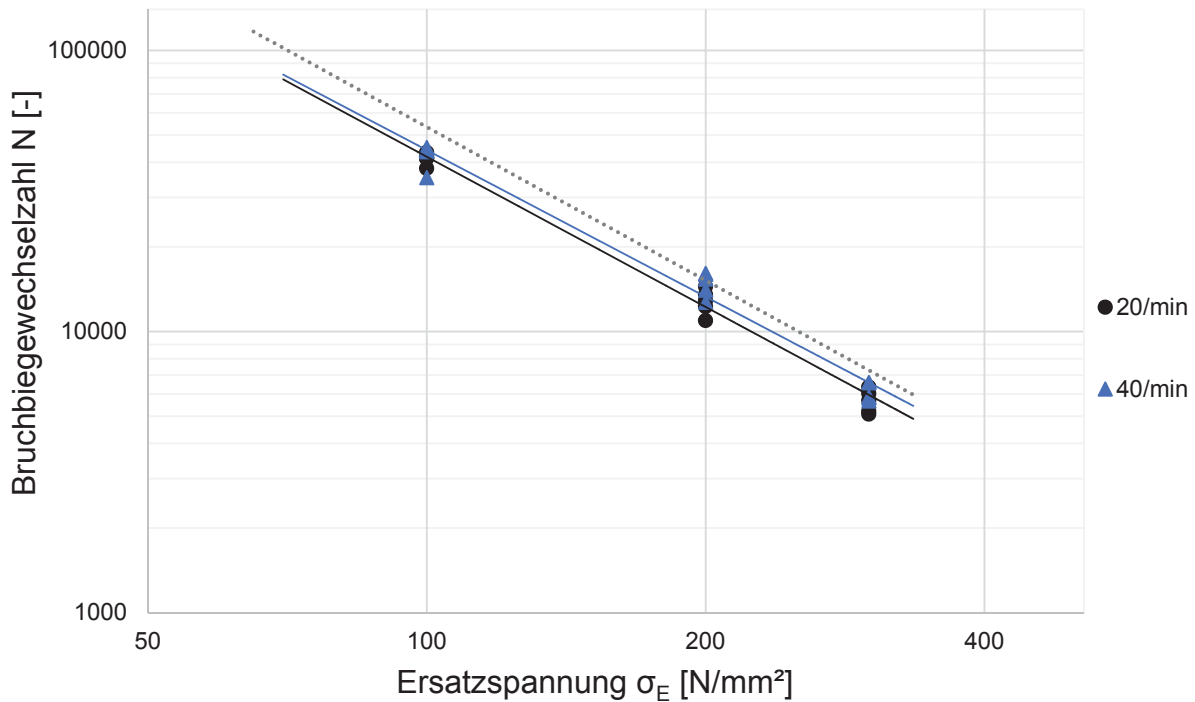


Abbildung 40: Einfluss der Zugspannung und der Biegefrequenz auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus Eoston® FT093 bei $D/d = 12,5$ und Hublänge 250 mm

Aus den Abbildungen 37 bis 40 (gepunktete Linien sind Werte für Dyneema® SK75 als Vergleich) ist ersichtlich, dass die Seile aus den unterschiedlichen UHMW Polyethylen-Fasern ähnliches Verhalten auf die eingeleiteten Belastungen zeigen. Entgegen der Prognose, dass die Seile aus der Faser Dyneema® SK75 die niedrigsten Bruchzyklenzahlen aufweisen müsste, zeigt lediglich die Faser Spectra® S1000 überlegende Leistungsfähigkeit gegenüber den Fasern Dyneema® SK75, während die asiatischen Fasern in den Werten der Bruchzyklenzahlen deutlich hinter Dyneema® SK75 zurück bleiben. Es ist also davon auszugehen, dass es zumindest bei den untersuchten Fasertypen nicht möglich ist, aus den Garnabrasionsversuchen nach ASTM D 6611 auf das Verhalten in Dauerbiegeversuchen mit dem hier verwendeten Aufbau zu schließen.

Bei den Seilen aus Dyneema® SK75 kann bei Ersatzspannungen von $\sigma_E \leq 150$ N/mm² eine deutliche Erhöhung der Lebensdauer durch Erhöhung der Biegefrequenz diagnostiziert werden (vgl. Abb. 37). Bei den anderen Fasern konnte eine solche Erhöhung der Lebensdauer nicht nachgewiesen werden, jedoch zeigte sich selbst bei diesen Fasern, zumindest im untersuchten Bereich, kein negativer Einfluss der Biegefrequenz auf die Lebensdauer. Weiterhin zeigt sich, dass die Seile aus der Faser

Spectra® S1000, deren mittlere Bruchspannung ca. 8,5% oberhalb der mittleren Bruchspannung von Dyneema® SK75 liegt, bei einer Ersatzspannung von 100 N/mm² um ca. 80% höhere Bruchbiegewechselzahlen erreichen als Seile aus Dyneema® SK75. Die Seile aus den Fasern TNX® und Eosten® FT093, deren mittlere Bruchspannungen ca. 4% unter der mittleren Bruchspannung von Dyneema® SK75 liegen, zeigen bei einer Ersatzspannung von $\sigma_E \leq 100$ N/mm² etwa 25% niedrigere Bruchbiegewechselzahlen als Dyneema® SK75. Mit steigender Ersatzspannung nimmt der Unterschied zwischen den einzelnen Fasern ab.

Als eine mögliche Ursache für die gravierenden Unterschiede in der Lebensdauer im Dauerbiegeversuch wurden die applizierten Faserschichten identifiziert. Um diesen Sachverhalt zu untersuchen, wurden die Seile 48 Stunden in einem Ultraschallbad gewaschen, wobei das Ultraschallbecken über einen Kreislauf zur Wasserzirkulation mit integriertem Filter mit einer absoluten Porengröße von 0,5 µm verfügt. So konnte sichergestellt werden, dass nicht wasserlösliche Partikel, die nicht schwimmfähig sind, im Filter eingeschlossen wurden. Schwimmfähige Partikel setzten sich ohnehin an der Oberfläche ab. Parallel wurden Vergleichswaschungen in Aceton (Handwäsche) durchgeführt. Alle Proben wurden nach dem Waschen für 24 Stunden bei 40°C getrocknet. Es konnten die in Tabelle 23 gezeigten Masseanteile an Schlichte ausgewaschen werden.

Tabelle 23: Masseanteile der aus Seilen aus UHMW Polyethylen ausgetragenen Faserschichte

Werkstoff	Dyneema® SK75	Spectra® S1000	TNX®	Eosten® FT093
Probenmasse vor Ultraschallwäsche [g]	196,7	200,9	199,5	185,1
Probenmasse nach Ultraschallwäsche [g]	195,0	198,7	199,5	185,1
Probenmasse vor Wäsche in Aceton [g]	196,7	199,0	177,3	177,4
Probenmasse nach Wäsche in Aceton [g]	195,0	196,9	177,3	177,4
Schlichteanteil [%] (massebezogen)	ca. 0,86	1,06 – 1,1	(unbekannt)	(unbekannt)

Da sich bei den Fasern TNX® und Eosten® FT093 weder im Ultraschallbad noch mit Aceton Schlichte auswaschen ließ, wurde ein in der Beschichtungstechnik geläufiger Schnelltest durchgeführt, um zu prüfen, ob die Fasern ohne Schlichte ausgeliefert oder während der Herstellung eventuell mit einer silikonbasierten Schlichte versehen werden. Dazu wurden Proben aus den Seilen kurzzeitig (ca. 0,5 Sekunden) in ein Wasserbad getaucht und sofort wieder entnommen. Da Silikone nicht nur als Feststoffe sondern auch als Öle stark wasserabweisend sind [Reu69] [Tom90], ist eine Benetzung nicht oder nur beschränkt möglich, was bei einem Vorhandensein von Silikon zur Bildung von Wassertropfen auf der Seiloberfläche führen müsste. Wenn keine Schlichte appliziert ist, sollte das Benetzungsverhalten ähnlich den Seilen aus den Fasertypen Dyneema® SK75 und Spectra® S1000 sein, die über olefinisch-paraffinische Schichten verfügen, welche chemisch den Fasergrundmaterialien sehr ähnlich sind und daher ein ähnliches Benetzungsverhalten zeigen.

In Abbildung 41 ist zu sehen, dass die Seile aus den asiatischen Fasern (TNX® und Eosten® FT093) beim Benetzen mit Wasser eine deutliche Bildung von Wassertropfen auf der Oberfläche zeigen, was ein deutliches Indiz für silikonbasierte oder silikonhaltige Schlichte ist. Die Seile aus Dyneema® SK75 und Spectra® S1000 zeigen diese Tropfenbildung nicht. Daher lässt sich schlussfolgern, dass die Fasern TNX® und Eosten® FT093 mit silikonischen Schichten beschichtet werden.



Abbildung 41: Silikonschnelltest an Faserseilen aus UHMW Polyethylen-Fasern
Oben von links nach rechts: Dyneema® SK75; Spectra® S1000
Unten von links nach rechts: TNX®, Eosten® FT093

Die Unterschiede in der Wirkungsweise der Schichten stellen sich wie folgt dar:

Olefinische und paraffinische Wachse, welche unterhalb der Schmelztemperatur physikalisch den Feststoffen zuzuordnen sind, neigen unter Pressung und Scherung zum Fließen, was bei der Verwendung als Schmierstoff ausgenutzt wird. Je höher jedoch die Pressung, umso stärker fließen solche Schmierstoffe, was zu einem Durchbrechen des Schmierfilmes und damit zu erhöhtem Verschleiß führen muss. Im Fall der Silikonöle neigen einige Typen dazu, unter steigender Schergeschwindigkeit oder Pressung die Viskosität zu erhöhen [Wac01], was auch als Dilatanz bezeichnet wird [Geh98]. Andere Typen zeigen jedoch eine Verringerung der Viskosität mit steigender Schergeschwindigkeit, was als Strukturviskosität bezeichnet wird [Geh98]. Damit ergeben sich für die mit Silikonschichte versehenen Fasertypen zwei Ansätze zur Erklärung der mit steigender Belastung abnehmenden Lebensdauer im Dauerbiegeversuch. Der erste Ansatz wäre, dass durch die auftretenden Pressungen zwischen den Fasern einer Litze das Silikonöl eine so starke Viskositätserhöhung erfährt, dass es nahezu fest ist und als Abrasivstoff im Seil wirkt. Der zweite Ansatz basiert auf der Annahme, dass durch die steigende Pressung mit steigender Ersatzspannung der Schmierfilm, welcher durch die Schlichte entsteht, durchbrochen und somit der Verschleiß beschleunigt wird.

Wenn dilatantes Verhalten als Ursache der Reduzierung der Lebensdauer im Dauerbiegeversuch als Ursache anzunehmen wäre, so müsste eine steigende Geschwindigkeit bei gleichbleibender Belastung zu einer Abnahme der Lebensdauer führen, was bei den Fasern TNX[®] und Eosten[®] FT093 jedoch nicht diagnostiziert werden konnte. Daher ist der Ansatz, dass ein Durchbrechen des Schmierfilms die Ursache für die geringere Lebensdauer bei erhöhter Last ist, als Erklärung für die Abnahme der Lebensdauer im Dauerbiegeversuch mit Belastung wahrscheinlicher.

Aus dem voranstehenden Abschnitt lässt sich nun schlussfolgern, dass die ähnlichen Lebensdauern im Garnabrasionsversuch nach ASTM D 6611 (vgl. Kap. 4.1.2) durch die geringen Lasten und nicht durch die Schichten bedingt sind, da im Biegeversuch deutlich höhere Unterschiede in den Lebensdauern festgestellt werden, als das im Garnabrasionsversuch nach ASTM D 6611 der Fall war.

Als nächster, die Lebensdauer beeinflussender Faktor wird die Länge der Biegezone, im Weiteren Biegelänge genannt, eingehender untersucht. Dazu wurde die Hublänge an der Prüfmaschine von bisher $l_{Hub} = 250 \text{ mm}$ auf 360 mm und 500 mm erhöht.

Ein voller Biegewechsel wird dabei nur auf die Seilbereiche appliziert, die während eines Hubes der Maschine auf die Prüfscheibe auflaufen und auch wieder ablaufen. Die Seilabschnitte, die nur auf die Scheibe auflaufen oder nur von der Scheibe ablaufen, erfahren nur einen halben Biegewechsel. Geht man von einer Umschlingung von 180° auf der Prüfscheibe aus, so beträgt die Länge $l_{1/2}$ des Seilabschnittes, welcher keinen vollen Biegewechsel pro Hub erfährt, ungefähr $l_{1/2} = 117$ mm, sodass die reale Länge der Biegezone geringer ausfällt. Tabelle 24 zeigt eine Gegenüberstellung der Maschineneinstellung für die Hublänge l_{Hub} und der realen Länge der Biegezone l_{BZ} .

Tabelle 24: Hublänge und reale Länge der Biegezone bei den Dauerbiegeversuchen

Einstellwert der Hublänge l_{Hub} [mm]	Länge der Biegezone l_{BZ} [mm]	Längenverhältnis V_L [-]
250	133	1,14
360	243	2,08
500	383	3,27

Aus den Werten für die Länge der Biegezone l_{BZ} und der Seillänge $l_{1/2}$ lässt sich nach Gleichung 20 ein Längenverhältnis V_L berechnen zu:

$$V_L = \frac{l_{BZ}}{l_{1/2}} \quad (20)$$

Dabei gibt V_L das Verhältnis zwischen der Länge der Biegezone und den Seilbereichen an, die nur mit der halben Anzahl Biegewechsel belastet werden (vgl. auch Tab. 22). Über eine Anpassung der Biegefrequenz wurde sichergestellt, dass die Seilgeschwindigkeit mit 5 m/min konstant bleibt. Die Ersatzspannung wurde für die Untersuchung des Einflusses der Biegelänge mit $\sigma_E = 100$ N/mm² konstant gehalten. Aus den in Abbildung 42 dargestellten Ergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass eine steigende Biegelänge zu kleineren Lebensdauern führt.

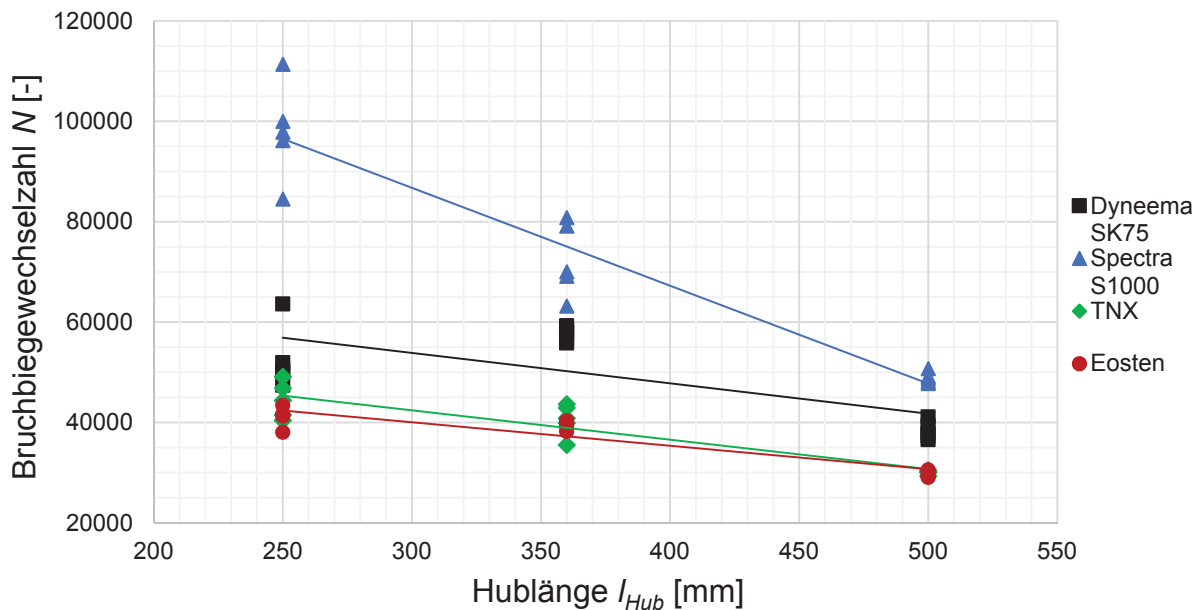


Abbildung 42: Einfluss der Biegelänge auf das Dauerbiegeverhalten von Seilen aus UHMW Polyethylen bei $D/d = 12,5$ und $\sigma_E = 100 \text{ N/mm}^2$

Ähnliche Effekte sind bei Drahtseilen bekannt, jedoch wird im Fall der Drahtseile davon ausgegangen, dass der Einfluss der Biegelänge nur statistisch bedingt ist [Fey11]. Das bedeutet, dass man bei Drahtseilen als Ursache für die verringerte Lebensdauer mit steigender Biegelänge die steigende Wahrscheinlichkeit eines Materialfehlers im Bereich der Biegezone annimmt [Fey11].

Das qualitativ unterschiedliche Verhalten der Seile aus UHMW Polyethylen-Fasern lässt darauf schließen, dass bei diesen Faserseilen zusätzlich noch andere Ursachen für die sinkende Lebensdauer bei steigender Biegelänge vorhanden sind.

Eine Ursache könnte die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Fasern [Hei13] sein. Durch die Relativbewegung zwischen den Litzen und die daraus resultierende Reibarbeit, wird Wärme in die Fasern übertragen. Es ist nun zu berücksichtigen, dass sich an beiden Enden der Biegezone ein Bereich mit der Länge $l_{1/2}$ befindet, der nur der halben Anzahl Biegewechsel ausgesetzt ist, da der zu Beginn der Prüfung auf der Prüfscheibe liegende Seilbereich während eines Hubes nur von der Scheibe ab läuft und erst beim reversierenden Hub wieder auf die Scheibe auf läuft. Erst an diese Bereiche schließen sich völlig unbelastete Seilbereiche an.

Geht man davon aus, dass in den Bereichen $l_{1/2}$ weniger Wärme erzeugt wird als in der Biegezone und folgt weiterhin dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik, wonach Wärme nicht von einem Körper niedrigerer Temperatur auf einen Körper höherer

Temperatur übergehen kann, so folgt daraus, dass die Wärme aus der Biegezone entlang des Seiles, über die Bereiche der Länge $l_{1/2}$, in unbelastete Bereiche abgeleitet wird. Zusätzlich erfolgt entlang des ganzen Seiles die Übertragung der Wärme an die Umgebung.

Aus Datenblättern zur Fasern Dyneema® SK75 ist bekannt, dass die Wärmeleitung in den Fasern entlang der Achse etwa 100 mal schneller abläuft als quer zur Faserachse [Dyn08], sodass davon auszugehen ist, dass die Ableitung entlang des Seiles deutlich schneller erfolgt als die Abkühlung quer zur Faserachse, da sich durch die Zwirn- und Flechtstruktur mit Luft gefüllte Zwischenräume im Seil befinden. Beachtet man nun das steigende Längenverhältnis V_L , so ist ersichtlich, dass mit steigender Biegelänge ein deutlich längerer Seilbereich thermisch beeinflusst wird. Da die geringer belasteten Seillängen $l_{1/2}$ konstant bleiben, die vollständig unbelastete Seillänge nur den durch das Spleißen bedingten Schwankungen von einigen Millimetern unterliegt und die Wärmeleitfähigkeit mit steigender Temperatur nur geringfügig ansteigt, kann der Abfall der Lebensdauer mit steigender Biegelänge im Dauerbiegeversuch mit einem Wärmestau in der Faser erklärt werden, welcher zu einem Festigkeitsabfall in der Faser führen kann (vgl. auch [Hei13]) und so die Lebensdauer negativ beeinflusst.

4.2.4 Thermofixierbarkeit

Das Thermofixieren der Seile wurden, wie in Kapitel 3.3.8 genannt, bei einer relativen Fixierspannung von 12% unter Variation der Thermofixiertemperaturen durchgeführt. Da die Bruchkraftsteigerung durch den beim Thermofixieren abnehmenden Seilquerschnitt nicht aussagekräftig ist, wurden die Ergebnisse der Zugversuche auf die Seilfeinheit bezogen, um eine spezifische Festigkeit zu erhalten, wie in den Abbildungen 43 bis 46 aufgeführt.

Es zeigte sich beim Thermofixieren bei allen Fasertypen der interessante Effekt, dass die Festigkeit nicht kontinuierlich mit steigender Thermofixiertemperatur zunimmt. Alle Fasern zeigen einen Einbruch der spezifischen Festigkeit bei einer Thermofixiertemperatur von 135°C, jedoch ist die Festigkeit nach dem Thermofixieren bei 135°C weiterhin deutlich höher als ohne Thermofixierung. Bei einer weiteren Erhöhung der Thermofixiertemperatur bis auf 145°C wurde bei allen Fasern eine weitere Steigerung der Festigkeit festgestellt.

Die Seile aus den Fasern Spectra® S1000 und TNX® zeigten bei einer Erhöhung der Fixiertemperatur einen weiteren Anstieg der spezifischen Festigkeit, während bei den Fasern Dyneema® SK75 und Eosten® FT093 die spezifische Festigkeit, im Vergleich zu den bei 145°C erzielten Werten, etwas niedriger ausfiel.

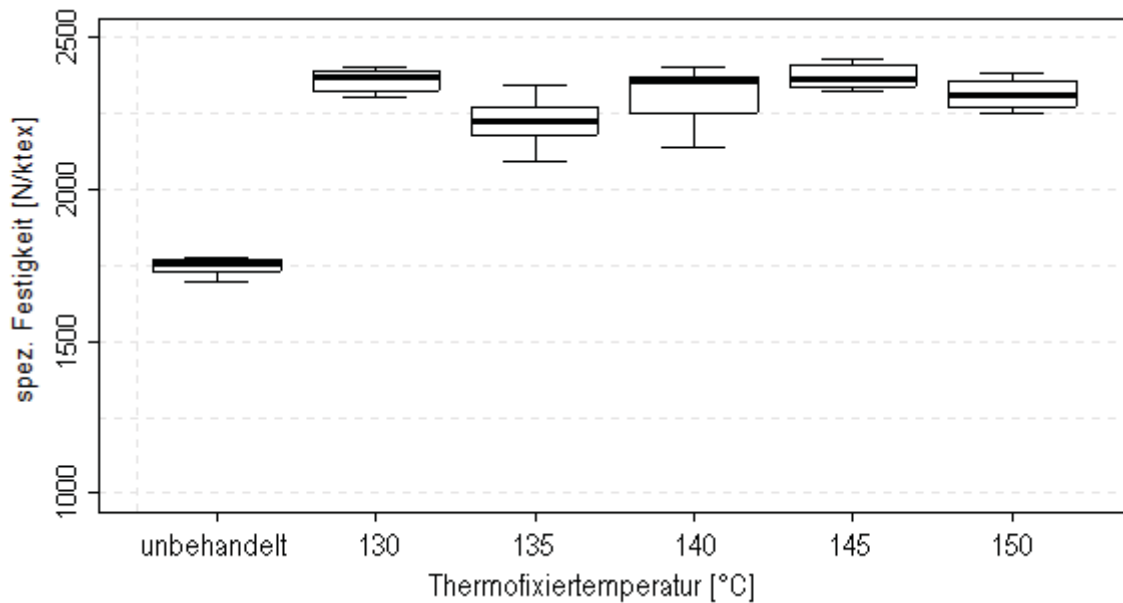


Abbildung 43: Spezifische Festigkeit der Seile aus Dyneema® SK75 nach dem Thermofixieren

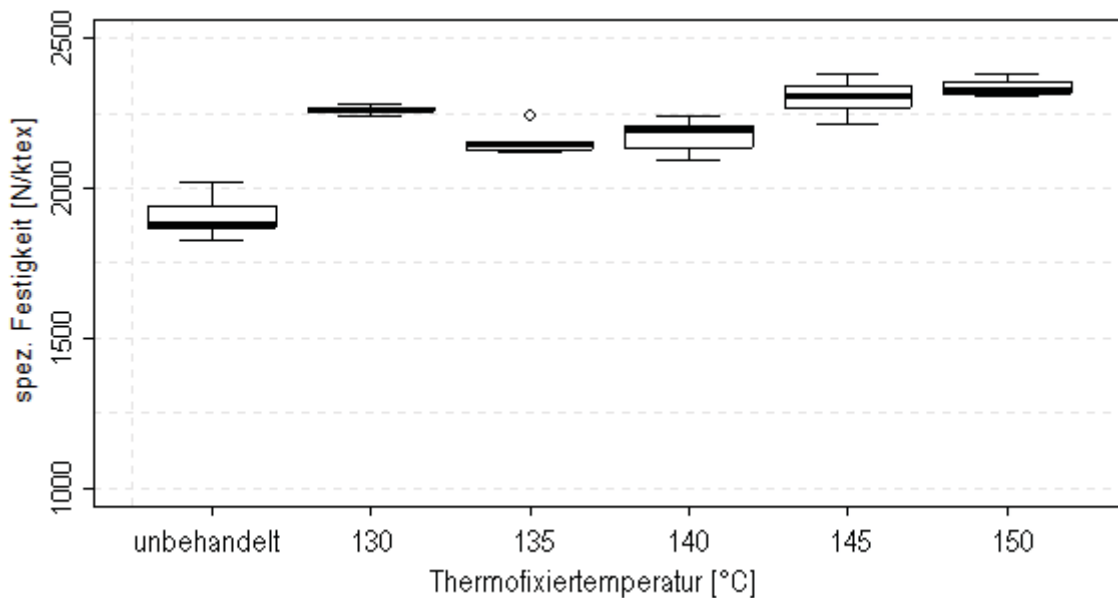


Abbildung 44: Spezifische Festigkeit der Seile aus Spectra® S1000 nach dem Thermofixieren

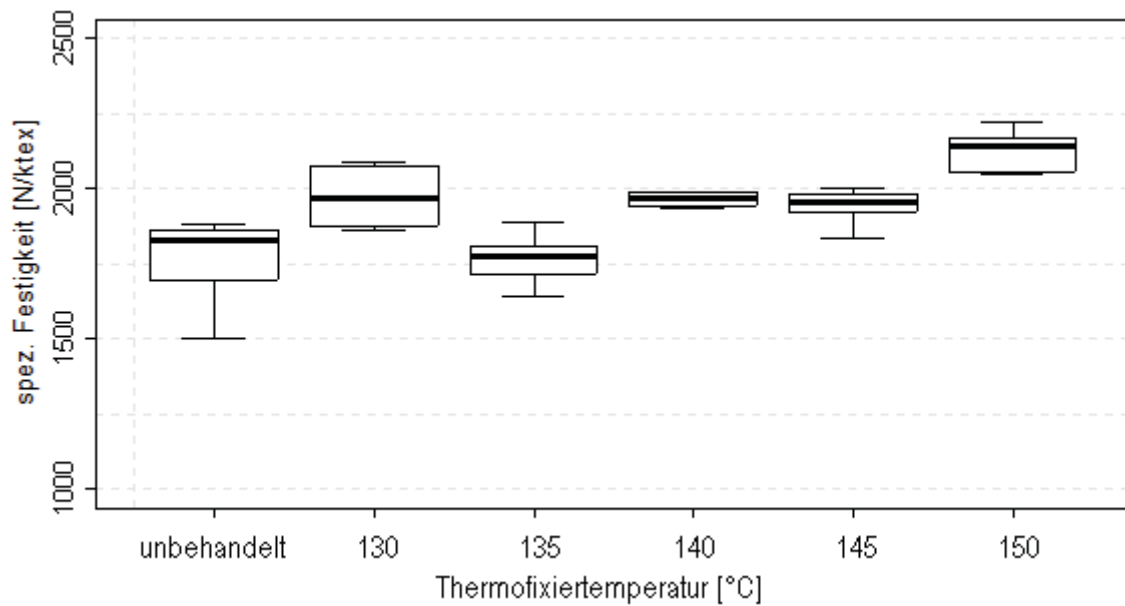


Abbildung 45: Spezifische Festigkeit der Seile aus TNX® nach dem Thermofixieren

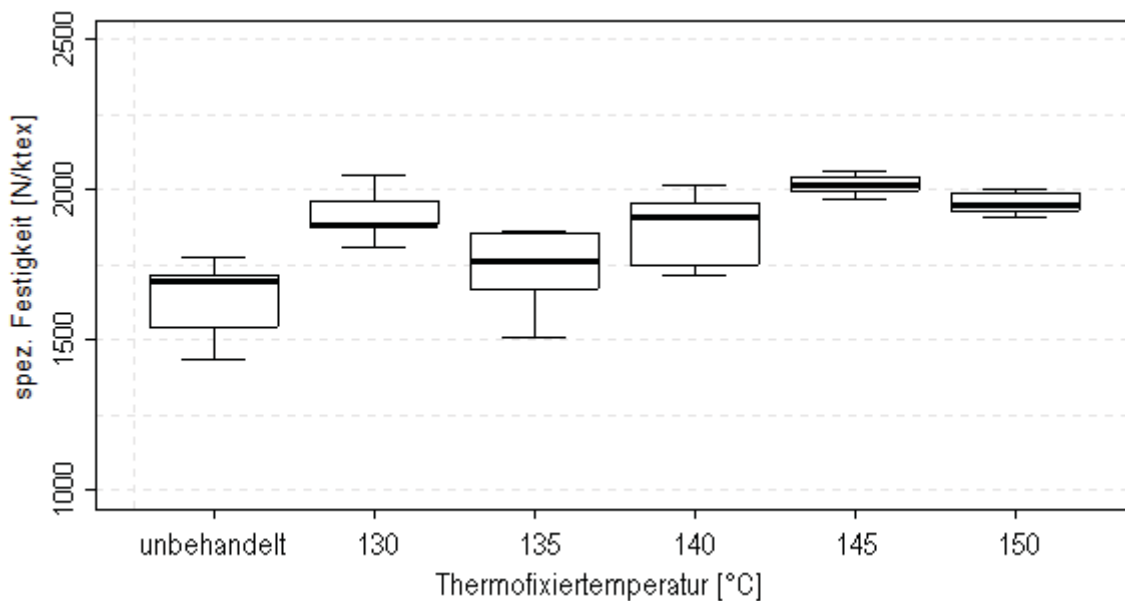


Abbildung 46: Spezifische Festigkeit der Seile aus Eosten® FT093 nach dem Thermofixieren

Die Proben, die die höchste Steigerung der spezifischen Festigkeit in N/ktex zeigten, wurden für eine nachfolgende Dichtebestimmung analog zu Kapitel 3.3.2 und Berechnung der Querschnittsfläche nach Gleichung 14 (vgl. Kap. 4.1.1) herangezogen. Dazu wurde die Seilfeinheit der Seile nach dem Thermofixieren erneut bestimmt.

Für die erneute Bestimmung der Dichte wurden einzelne Litzen aus den thermofixierten Seilen entnommen und entsprechend präpariert. Alle Fasern zeigen eine Abnahme der Dichte beim Thermofixieren mit steigender Thermofixiertemperatur (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25: Ausgewählte Proben und zugehörige Thermofixiertemperaturen

Werkstoff	Thermofixiertemperatur [°C]	Dichte [g/cm³]
Dyneema® SK75	Ohne	0,975
	130°C	0,943
	145°C	0,931
	150°C	0,935
Spectra® S1000	Ohne	0,9671
	130°C	0,929
	145°C	0,936
	150°C	0,932
TNX®	Ohne	0,984
	130°C	0,902
	145°C	0,917
	150°C	0,917
Eoston® FT093	Ohne	0,9345
	130°C	0,912
	140°C	0,918
	150°C	0,929

In [HeM11] wird von Heinze, in Zusammenarbeit mit dem Autor der vorliegenden Arbeit, die These erstellt, dass das Thermofixieren von Faserseilen aus UHMW Polyethylen-Fasern zu einer Änderung der Fasermorphologie in den Filamenten führt. In weiterführenden Untersuchungen wird die These durch Heinze derart erweitert, dass die Orientierung der Moleküle entlang der Achse abnimmt. Heinze stützt seine These durch Ergebnisse einer dynamisch-mechanischen Analyse [Hei13].

Die Dichte eines Werkstoffes wird primär durch die Bindungsenergie im Werkstoff bestimmt. Bei Polymeren, die weder Mehrfachbindungen noch funktionelle Gruppen enthalten, wie im vorliegenden Fall von Polyethylenfasern, sind die Bindungen zwischen den Molekülketten, die auf van-der-Waals-Kräften beruhen, von den Bindungsabständen zwischen den Molekülketten, und damit von der Morphologie, abhängig [Bar00] [Dom05].

Aus der sinkenden Dichte kann darauf geschlossen werden kann, dass es zu einer Änderung der Orientierung in den Polymerfasern kommt, da kleinere Bindungsabstände bedeuten, dass der Abstand zwischen den Molekülketten steigt, was wiederum einen größeren Raumbedarf einer bestimmten Anzahl Moleküle und damit eine geringere Dichte des Werkstoffes bedeutet.

Auf Basis der in Tabelle 25 gezeigten Dichtewerte erfolgte die Umrechnung der Bruchkräfte aus den Zugversuchen in Bruchspannungen der thermofixierten Seile. Die Abbildungen 47 bis 50 zeigen die durch Thermofixieren erzielten Bruchspannungen der Seile im Vergleich zu den Werten ohne thermomechanische Behandlung.

Die Ergebnisse des Thermofixierens bei 130°C bestätigen die in [Hei13] gezeigten Daten für die Fasern Dyneema® SK75. Nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C konnten für die Faser Dyneema® SK75 keine höheren Festigkeiten erzielt werden.

Weiterhin ist erkennbar, dass die Thermofixiertemperatur zum Erreichen höchstmöglicher Festigkeitssteigerungen nicht bei allen Fasern aus UHMW Polyethylen gleich ist. Zwar konnten bei allen Fasern bei einer Fixiertemperatur von 130°C Festigkeitssteigerungen erzielt werden, jedoch zeigten einige Fasern eine weitere, signifikante Festigkeitssteigerung bei höheren Thermofixiertemperaturen.

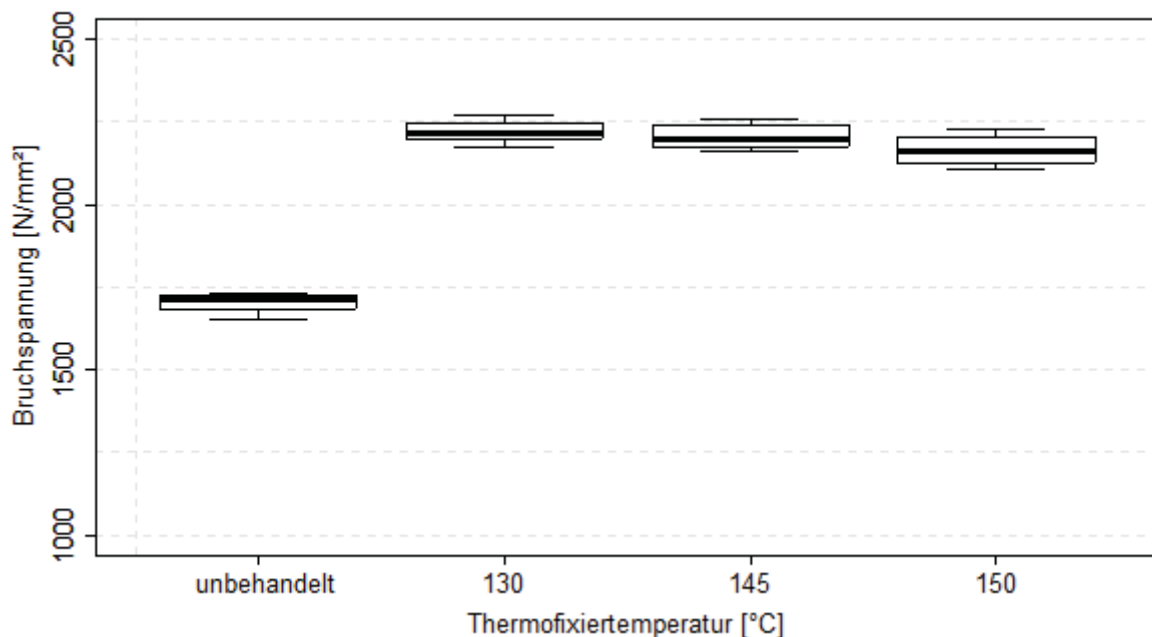


Abbildung 47: Bruchspannung der Seile aus Dyneema® SK75 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C

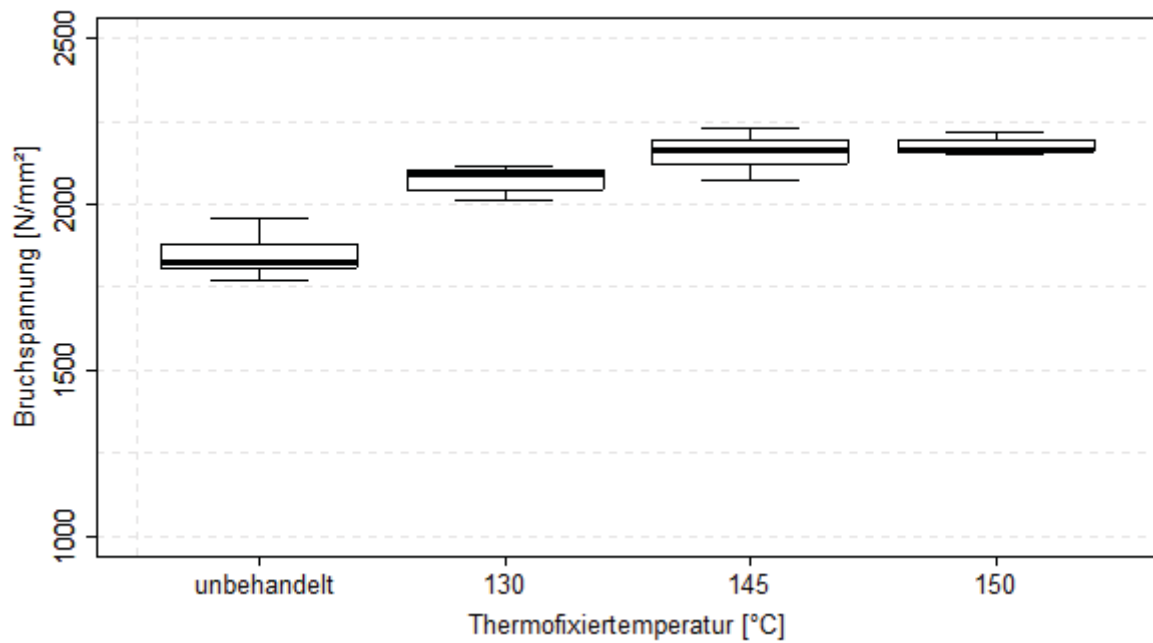


Abbildung 48: Bruchspannung der Seile aus Spectra® S1000 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C

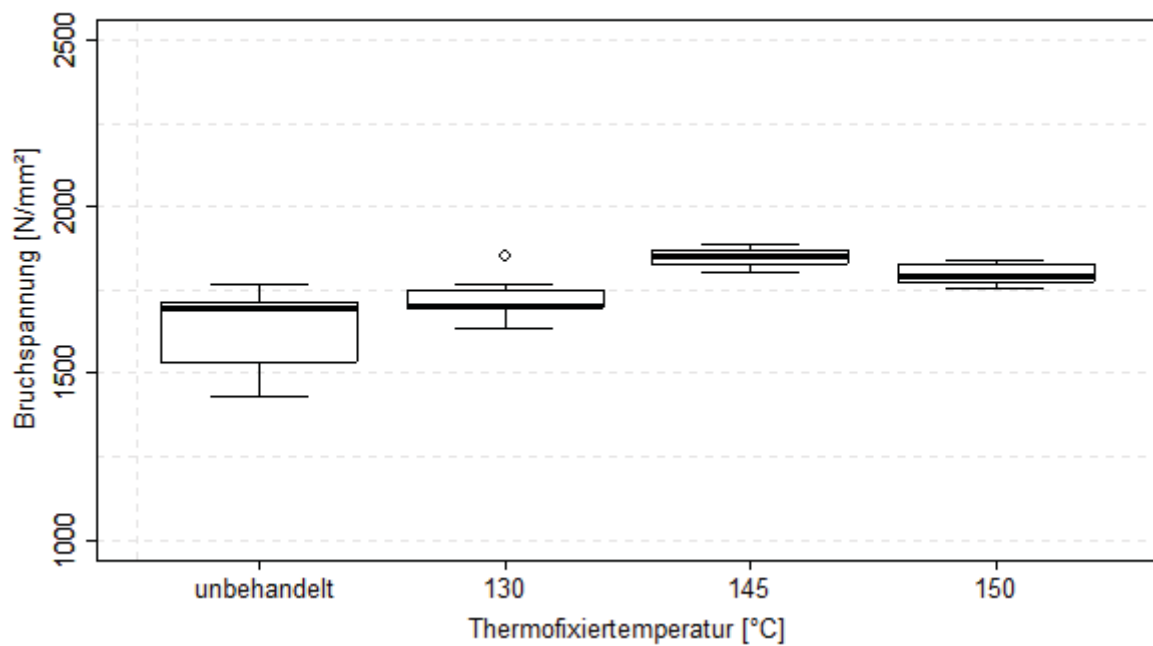


Abbildung 49: Bruchspannung der Seile aus TNX® nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C

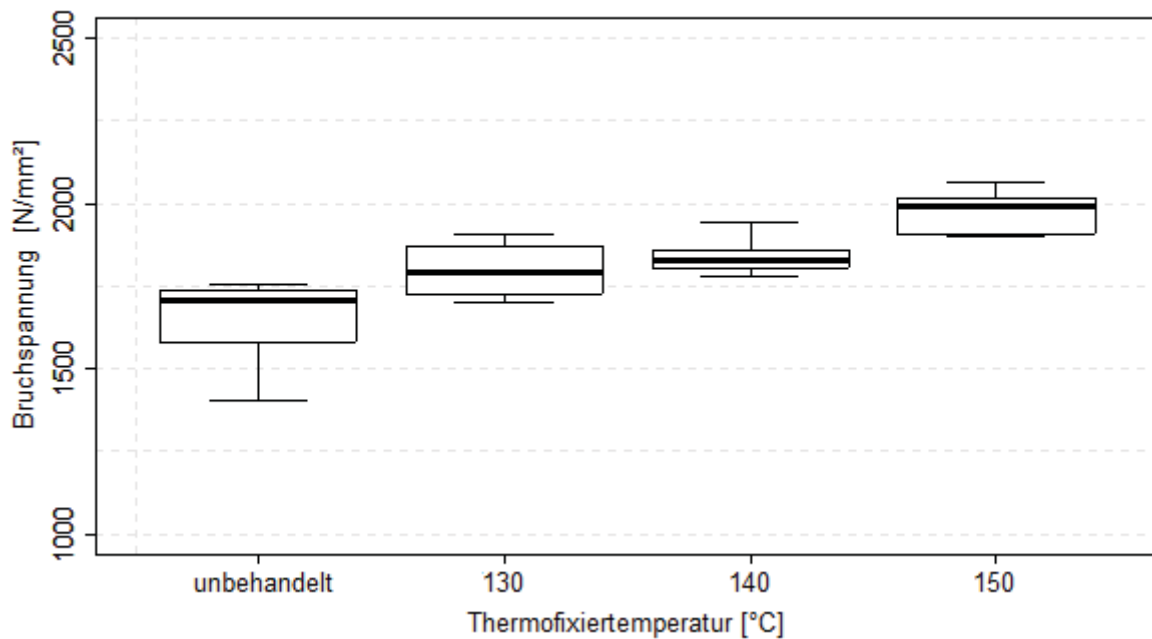


Abbildung 50: Bruchspannung der Seile aus Eoston® FT093 nach dem Thermofixieren bei Temperaturen oberhalb von 130°C

Aus den in den Abbildungen 47 bis 50 gezeigten Bruchspannungen lassen sich ohne weitere Betrachtungen keine Aussagen zu den möglichen Festigkeitssteigerungen ableiten, da z.B. die Flechtlänge bei geflochtenen Faserseilen einen Einfluss auf die Ausgangsfestigkeit des Seiles vor dem Thermofixieren hat [McK04], diese sich aber beim Thermofixieren signifikant verändert. Tabelle 26 zeigt die Veränderung der Flechtlänge über die Variation der Thermofixiertemperatur für die untersuchten Werkstoffe. Dabei sind die prozentualen Zunahmen der Flechtlänge auf die real vorliegenden Flechtlängen der Seile im Ausgangszustand (vgl. Kapitel 4.2.1) bezogen und nicht auf die Vorgaben zur Seilherstellung.

Wie erkennbar ist, nimmt die Flechtlänge mit steigender Thermofixiertemperatur um bis zu 14,7 % zu. Dabei bedeutet nach [Hei13] eine Erhöhung der Flechtlänge um 5% eine Erhöhung der Ausgangsfestigkeit eines nicht thermofixierten, geflochtenen Seiles aus Dyneema® SK75 um ca. 2%, eine Erhöhung der Flechtlänge um 15% eine Erhöhung der Ausgangsfestigkeit des Seiles aus Dyneema® SK75 um ca. 6%.

Tabelle 26: Zunahme der Flechtlänge durch Thermofixierung

Werkstoff	Relative Erhöhung der Flechtlänge [%] nach dem Thermofixieren				
	130°C	135°C	140°C	145°C	150°C
Dyneema® SK75	4,0 – 4,8	8,8 – 9,4	9,0 – 9,9	9,8 – 10,4	11,3 – 12,4
Spectra® S1000	4,0 – 5,1	8,3 – 8,6	8,8 – 9,6	9,5 – 10,1	12,5 – 13,2
TNX®	5,5 – 6,3	7,5 – 8,1	8,5 – 9,4	9,5 – 10,4	11,5 – 12,2
Eosten® FT093	5,8 – 6,3	8,5 – 9,4	8,8 – 9,6	9,0 – 10,1	13,8 – 14,7

Weiterhin verringert sich der tragende Querschnitt der Seile. Damit ist eine Angabe der absoluten Erhöhung der Festigkeit nicht möglich. Um diese Angabe zu generieren, müssten erneut Seile geflochten werden, die in der Zwirnrate, der Flechtlänge und der Seilfeinheit mit den thermofixierten Seilen übereinstimmen. Bei solchen Seilen müsste die Bruchspannung im unfixierten Zustand bestimmt und mit den hier durch Thermofixieren erzielten Bruchspannungen verglichen werden. Dennoch lassen sich aus den vorhandenen Daten einige Erkenntnisse ableiten.

So lässt sich erkennen, dass bei den Fasern Dyneema® SK75 Festigkeitssteigerungen von ca. 25% erreicht werden können, während bei den Fasern aus Spectra® S1000 Festigkeitssteigerungen von nur ca. 12% erreicht werden. Die Bruchspannungen der Seile aus Dyneema® SK75 und Spectra® S1000 zeigen nach dem Thermofixieren jedoch nahezu identische Werte, da die Seile aus Spectra® S1000 vor dem Thermofixieren höhere Festigkeiten zeigten. Bei den TNX® - Fasern wurden Festigkeitssteigerungen von 10% erreicht, bei den Fasern Eosten® FT093 Festigkeitssteigerungen von 15%.

Da die Literatur (z.B. [HeM11]) zeigt, dass die Ergebnisse beim Thermofixieren neben der Temperatur von der Fixierspannung abhängen und die für die Versuche gewählten 12% relative Fixierspannung nur als Optimum für die Fasern Dyneema® SK75 bekannt sind, müssen für die vorliegenden UHMW Polyethylen-Fasern weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Erste Versuche zeigten bereits, dass für Seile aus der Faser Eosten® FT093 bei einer Temperatur von 150°C und einer relativen Fixierspannung von 18% bessere Resultate erzielt werden können.

5 Abschätzung der Marktpotentiale anhand der Kosten der Seilherstellung

Ein weiterer Faktor, der beim Vergleich der Eigenschaften der Fasertypen zu berücksichtigen ist, und in einigen Fällen eine Entscheidung zu Gunsten einer bestimmten Faser bewirken kann, ist der Preis der Seile. So kann ein deutlich günstigerer Preis des Seiles unter Umständen schlechtere mechanische Eigenschaften aufwiegen, oder ein minimal teureres Seil bei deutlich überlegenen mechanischen Eigenschaften durchaus den Vorzug erhalten.

Um diesen Faktor besser abschätzen zu können, wurden bei einem Seilhersteller aus Deutschland und bei einem Seilhersteller aus Südafrika Daten zur Verteilung der Kosten bei der Seilherstellung angefragt. Es wurden dabei Kosten für das Fasermaterial, Kosten für Maschineneinsatz inklusive Energiekosten, und Kosten für Personal inklusive Verwaltungs- und Vertriebsaufwand mit Bezug zu den Gesamtkosten der Herstellung eines geflochtenen und thermofixierten Seiles mit dem Durchmesser von 6 mm aus Dyneema® SK75 angefragt. Tabelle 27 stellt die von den Herstellern übermittelten Daten in Form von normierten, relativen Kostenfaktoren dar.

Tabelle 27: Herstellerankünfte zu Kosten der Herstellung eines Seiles aus Dyneema® SK75

Sitz des Herstellers	Deutschland	Südafrika
Materialkosten K_M	75%	76%
Personalkosten K_P	20%	21%
Maschinen- und Energiekosten K_{ME}	5%	3%
Gesamtkosten Seilfertigung K_G	100%	100%

Auffallend ist, dass bei beiden Herstellern die Materialkosten ca. 3/4 der Gesamtkosten des Seiles betragen. Der in Südafrika höhere Prozentsatz für Personalkosten ist dadurch zu begründen, dass dort ein deutlich höherer Personaleinsatz erfolgt. Auf Nachfrage wurde die Auskunft erteilt, dass die Lohnkosten für einen Mitarbeiter pro Arbeitsstunde umgerechnet ca. 3,50 € betragen, und daher deutlich mehr Personal eingesetzt wird, als in europäischen Ländern üblich. Zum Kostensatz 3,50 € pro Stunde ist die Beschäftigung eines Mitarbeiters in Deutschland nicht möglich.

Da sich der Anteil der Materialkosten an den Herstellungskosten zwischen einem europäischen Industrieland und einem Entwicklungsland wie Südafrika kaum unterscheiden, wurden auf Basis der Daten des in Deutschland ansässigen Herstellers folgende rechnerischen Zusammenhänge als Grundlage für die weiteren Betrachtungen gewählt:

$$K_G = K_M + K_P + K_{ME} \quad (21)$$

$$K_M = 0,75 K_G \quad (22)$$

$$K_P = 0,2 K_G \quad (23)$$

$$K_{ME} = 0,05 K_G \quad (24)$$

Um abschätzen zu können, welches wirtschaftliche Potential die asiatischen Fasern zur Verwendung in Faserseilen für technische Anwendungen bieten, wurde das Referenzseil mit dem Nenndurchmesser von 6 mm, gefertigt aus der Faser Dyneema® SK75, als Referenz mit einem Kostenfaktor von 100% zugrunde gelegt, und eine Berechnung der Kostenfaktoren der Seilherstellung bei der Verwendung der weiteren untersuchten Fasern, Spectra® S1000, TNX® und Eoston® FT093, zum Vergleich ermittelt. Dazu wurden die Faserpreise aus Tabelle 6 in Kapitel 3.1.1 als Grundlage genutzt. Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass sich die Materialkosten zu 100% aus den Kosten der Fasern ergeben. Es gelten demnach die in den Gleichungen 25 bis 27 gezeigten Zusammenhänge bezüglich der Materialkosten zwischen den Fasern:

$$K_{MS1000} = \frac{50,00\text{€}}{45,00\text{€}} K_{MSK75} = \frac{10}{9} K_{MSK75} \quad (25)$$

$$K_{MTNX} = \frac{30,00\text{€}}{45,00\text{€}} K_{MSK75} = \frac{2}{3} K_{MSK75} \quad (26)$$

$$K_{MFT093} = \frac{22,50\text{€}}{45,00\text{€}} K_{MSK75} = \frac{1}{2} K_{MSK75} \quad (27)$$

Geht man nun davon aus, dass sich bei der Verwendung einer anderen Faser keine Veränderungen der Anteile der einzelnen Kostenstellen an den Gesamtkosten ergeben, so ergeben sich bei Fertigung identischer Seile aus den anderen Fasern die folgenden Zusammenhänge zwischen den Gesamtkosten der Seilherstellung K_G für die einzelnen Fasern:

$$K_{GS1000} = 1,0825 K_{GSK75} \quad (28)$$

$$K_{GTNX} = 0,75 K_{GSK75} \quad (29)$$

$$K_{GFT093} = 0,625 K_{GSK75} \quad (30)$$

Es zeigt sich, dass die Fertigung eines Seiles ähnlich dem Referenzseil (Durchmesser 6 mm; Dyneema® SK75) aus der Faser Spectra® S1000 zu einer Erhöhung der Seilherstellungskosten um 8,25% im Vergleich zur Fertigung aus der Faser Dyneema® SK75 führt, was sich für den Endkunden in ca. 10% höheren Seilpreisen ausdrücken wird. Vor dem Hintergrund, dass die Seile aus Spectra® S1000 zwischen 30% und 80% höhere Lebensdauern im Dauerbiegeversuch zeigten, kann Spectra® S1000 in solchen Anwendungen als Ersatz für Dyneema® SK75 gelten, in denen die Kosten für einen Seilwechsel sehr hoch oder Stillstandszeiten in der Anwendung unbedingt zu vermeiden sind. Solche Anwendungen wären zum Beispiel Schachtförderanlagen oder Schlepp- und Verankerungsanwendungen in der Seefahrt und bei Offshore-Plattformen, bei denen ein Seilwechsel dazu führt, dass die jeweilige Anwendung nicht nutzbar ist. Die Faser Spectra® S1000 ist als Ersatzwerkstoff generell dann geeignet, wenn der Preis der Seile keine signifikante Rolle spielt und keine exakte Lebensdauervorhersage wegen sicherheitstechnischer Anforderungen nötig ist.

Bei einer Fertigung eines Seiles ähnlich dem Referenzseil aus der Faser TNX® sinken die Kosten der Seilherstellung um 25%. In Anwendungen wie z.B. Forst- und Landwirtschaftswinden oder Koppelwinden in der Binnenschifffahrt, bei denen beim Bruch des Seiles das Seil nicht getauscht, sondern durch Spleißen neu verbunden und weiterhin genutzt wird, bis entweder zwei Spleißstellen aneinander liegen oder eine Mindestspeicherlänge auf der Trommel unterschritten wird, spielen die Kosten für einen Seilwechsel keine nennenswerte Rolle. In solchen Anwendungen könnten TNX®- Fasern trotz der leicht unterlegenen mechanischen Eigenschaften zum Einsatz kommen. Weiterhin bieten die TNX®- Fasern durch ihren niedrigeren Preis die Möglichkeit, den Materialeinsatz im Seil um 33% zu steigern und trotzdem identische Kosten wie das Referenzseil aus Dyneema® SK75 auszuweisen. Bei Erhöhung des tragenden Querschnittes um 33% sinken, bei Beibehaltung der Nennkräfte, die Ersatzspannungen im Seil um 33%. Berücksichtigt man die Ergebnisse in Abbildung 39 in Kapitel 4.2.3, und verringert die Ersatzspannung um 33%, so könnte dieses Seil mit dem vergrößerten Querschnitt im Dauerbiegeversuch bei identischer Nutzlast Lebensdauern erreichen, die ca. 45% über den Lebensdauern der Seile aus Dyneema® SK75 liegen. Damit ist TNX® als Ersatzwerkstoff in allen technischen

Anwendungen geeignet, in denen kleine Seildurchmesser und die damit möglichen kleinen Biegeradien keine Vorgaben zur Realisierung der Anwendung sind, da bei einer Erhöhung des Durchmesser die Umlenkradien entsprechend angepasst werden müssen, was zu einer Bauraumvergrößerung führt.

Eine Fertigung aus der Faser Eosten® FT093 beinhaltet bezüglich der Herstellungskosten der Seile, bedingt durch den niedrigsten Preis aller untersuchten Fasern, noch deutlichere Vorteile. Die Kosten der Seilherstellung reduzieren sich hier um 37,5 %. Die Anwendung als Ersatzwerkstoff kann in den bereits für die Faser TNX® genannten Anwendungen erfolgen. Weiterhin könnte der Materialeinsatz bei Verwendung von TNX® an Stelle von Dyneema® SK75 auf das 1,7-fache erhöht werden, um ein Seil mit den gleichen Herstellungskosten zu erhalten, wenn man voraussetzt, dass der Aufwand für das Anbringen der doppelten Anzahl von Garnspulen auf dem Spulengatter, von dem die Litzen gezwirnt werden, den Aufwand für Personal um ca. 10% erhöht. Eine solche Erhöhung des tragenden Querschnittes reduziert die Ersatzspannung beispielsweise von 100 N/mm² auf ca. 59 N/mm². Schätzt man nun über Abbildung 40 in Kapitel 4.2.3 die möglichen Lebensdauern bei der genannten Reduzierung der Ersatzspannung ab, so ergeben sich mögliche Lebensdauern, die ca. 60% höher als die Lebensdauer des Referenzseiles sind. Der Vorbehalt der nötigen Bauraumvergrößerung bei der Beibehaltung der günstigen D/d-Verhältnisse bezüglich des größeren Durchmessers ist auch bei der Faser Eosten® FT093 ein einschränkendes Kriterium.

Aus den voranstehenden Absätzen ist erkennbar, dass die preisgünstigen Fasern in einigen Anwendungen bereits bei kleinen Seildurchmessern (6 mm) wirtschaftliche Vorteile ermöglichen. Da in Forst- und Landwirtschaftswinden häufig Seile mit größeren Durchmessern, z.B. 12 mm oder 16 mm (vgl. Abb. 1 in Kap. 1), verwendet werden, ist im Weiteren zu prüfen, ob bei größeren Seildurchmessern ähnliche wirtschaftliche Sparpotentiale gegeben sind.

Um diesen Fakt grob abzuschätzen, wurde davon ausgegangen, dass eine Verdopplung des Durchmessers nach der Formel zur Berechnung des Flächeninhaltes eines Kreises (vgl. Gleichung 31) den vierfachen Materialeinsatz bedingt.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} \quad (31)$$

Weiterhin wurde davon ausgegangen, dass sich der Maschinenaufwand im Vergleich zur Fertigung eines Seiles mit dem Durchmesser 12 mm im Vergleich zu einem Seil mit dem Durchmesser 6 mm nicht erhöht. Da aber auf das Spulengatter nun die vierfache Menge an Garnspulen angebracht werden muss, um die Litzen zu zwirnen, wird veranschlagt, dass sich der Personalaufwand um 20% gegenüber den Annahmen in Tabelle 27 erhöht. Aus den Annahmen ergeben sich die in Tabelle 28 dargestellten, auf Basis von Gleichungen 21 bis 24 geschätzten, neuen normierten, relativen Kostenfaktoren für die einzelnen Kostenstellen.

Tabelle 28: Kostenschätzung zur Herstellung von Seilen Ø12 mm aus Dyneema® SK75

Materialkosten K_{M12mm}	90%
Personalkosten K_{P12mm}	7%
Maschinen- und Energiekosten K_{ME12mm}	3%
Gesamtkosten Seilfertigung K_{G12mm}	100%

Es ist erkennbar, dass das wirtschaftliche Potential besonders für Landwirtschafts- und Forstanwendungen bei Seilen mit Durchmessern von 12 mm noch deutlich höher ist. So bedeutet eine Halbierung der Materialkosten eine Reduzierung der Gesamtkosten um 45%, was für den Endverbraucher, wenn der Hersteller nur einen Teil der Ersparnis an den Kunden weitergeben würde, eine Einsparung bei der Beschaffung der Seile von etwa 30% bedeutet. In Anwendungen mit geringen Kosten für Wartung und Stillstandszeiten würde der deutlich niedrigere Preis für die Seile die geringere Lebensdauer (etwa 25% niedriger) aufwiegen.

6 Zusammenfassung

Als Ergebnis der vorliegenden Arbeit wird zusammenfassend festgestellt, dass die Faser Dyneema® SK75, die sich bereits in einigen technischen Anwendungen etabliert hat, ein vielseitiger Werkstoff ist. Die Leistungsfähigkeit, die in einer Vielzahl von vergleichenden Versuchen als Referenz diente, ist als gut zu bezeichnen. Besonders bezeichnend ist dabei die Tatsache, dass die Festigkeitskennwerte in wiederholenden Messungen nur sehr geringen Schwankungen unterliegen, was für eine sehr gute Qualität der Fasern spricht. Diese Qualität konnte keiner der Vergleichswerkstoffe bieten. Somit ist festzustellen, dass keiner der geprüften Faserwerkstoffe als Ersatz in sicherheitsrelevanten Anwendungen in Frage kommt, da dort eine exakte Vorhersage der Lebensdauer verpflichtend ist, was mit keiner der anderen Fasern zweifelsfrei möglich ist.

Im Rahmen der Arbeit konnte die These, dass aus der Bestimmung der Verteilung der Molmasse von Fasern aus UHMW Polyethylen eine Vorhersage der zu erwartenden Varianz bei der Bestimmung der Zugfestigkeit der Fasern möglich ist, bewiesen werden. Eine Verfeinerung durch Untersuchung weiterer Fasern aus UHMW Polyethylen ist empfehlenswert. Die bewiesene These kann genutzt werden, um bei im Zugversuch ermittelten Werte abzuschätzen, ob mit einer bestimmten Anzahl n an Stichproben im Zugversuch eine statistisch zuverlässige Datenbasis geschaffen wurde, oder ob weitere Messungen nötig sind. Außerdem kann daraus abgeschätzt werden, ob eine Faser aus UHMW Polyethylen für eine bestimmte Anwendung mit hohen Sicherheitsanforderungen dienen kann.

Eine weitere im Rahmen dieser Arbeit erstellte These, wonach man aus differenzkalorimetrischen Untersuchungen die Zugfestigkeit von Fasern aus UHMW Polyethylen näherungsweise abschätzen kann, konnte nicht bestätigt werden.

Aus Sicht der Leistungsfähigkeit in Anwendungen mit Biegebelastungen schneidet Dyneema® SK75, als zweit teuerstes Material, entsprechend nur mit dem zweiten Platz der vier untersuchten Fasern ab. Die Faser Spectra® S1000 ist in allen untersuchten Bereichen deutlich leistungsfähiger, wobei die bessere Leistungsfähigkeit den etwas höheren Preis deutlich überwiegt. Die asiatischen Fasern sind nur dann als Ersatzprodukte geeignet, wenn über die Erhöhung des Durchmessers eine

Verringerung der Belastungen möglich ist, bzw. wenn Wartungskosten im Betrieb nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die Leistungsfähigkeit liegt etwa 25% unter der Leistungsfähigkeit der Faser Dyneema® SK75, die Preise der Fasern 33% bis 50% niedriger, weshalb zumindest ökonomische Vorteile möglich sind.

Die Eignung zum Thermofixieren wurde bei allen Fasern bestätigt, jedoch erzielten die Fasern stark unterschiedliche Festigkeitssteigerungen, wobei die Faser Dyneema® SK75 hier die besten Ergebnisse zeigte. Die Fasern Spectra® S1000 und TNX® zeigten die geringsten Festigkeitszuwächse im thermofixierten Seil, jedoch verfügten die Seile aus Spectra® S1000 schon vor dem Thermofixieren über deutlich höhere Festigkeiten, sodass die erreichten absoluten Festigkeiten nach dem Thermofixieren mit denen der Seile aus den Fasern Dyneema® SK75 vergleichbar sind. Die Festigkeiten der Seile aus den asiatischen Fasern erreichen nach dem Thermofixieren lediglich Werte, die leicht oberhalb der Festigkeiten liegen, die die Seile Dyneema® SK75 und Spectra® S1000 bereits ohne Thermofixierung zeigen.

In [Hei13] ist gezeigt worden, dass Seile aus Dyneema® SK75 Seile aus Stahldraht in ihrer Lebensdauer übertreffen können, vergleichbare Durchmesser, Festigkeit und D/d -Verhältnisse vorausgesetzt. Damit kann, belegt durch die Daten der vorliegenden Arbeit, davon ausgegangen werden, dass die grundsätzliche Eignung für technische Anwendungen für alle Fasern aus UHMW Polyethylen gegeben ist. Es ist jedoch festzustellen, dass der Einsatz in technischen Anwendungen mit Biegebelastungen (bei Durchmesserhältnissen von ca. $D/d = 12,5$) nur dann sinnvoll ist, wenn die Ersatzspannung im Betrieb 10% der Bruchspannung nicht übersteigt, da die Lebensdauer der Seile sonst sehr stark abnimmt. Bei größeren Durchmesserhältnissen könnten größere Ersatzspannungen gewählt werden. Wie schon die Faser aus Dyneema® SK75, bieten die untersuchten Fasern gegenüber Stahl den Vorteil, dass bei kleinen D/d -Verhältnissen, wie z.B. $D/d = 12,5$, für technische Anwendungen relevante Lebensdauern erreicht werden können, während bei Stahlseilen die Grenze für den wirtschaftlichen Einsatz bei $D/d = 25$ liegt [Fey00]. Die Eignung als statisches Zuelement ist, bezogen auf die Festigkeit, möglich, jedoch sind detailliertere Untersuchungen zum Kriechverhalten speziell bei asiatischen Fasern nötig, da es z.B. bei Anwendung als Abspannseile nicht wirtschaftlich ist, wenn die Seile häufig nachgespannt werden müssen.

Die Faser Spectra® S1000 ist, wegen der höheren Festigkeit und der um bis zu 80% überlegenen Lebensdauer im Dauerbiegeversuch, generell eine gute Alternative zur Faser Dyneema® SK75, und damit zum Werkstoff Stahl, jedoch ist die Anwendung in sicherheitsrelevanten Anwendungen, bedingt durch die starken Schwankungen der Festigkeitswerte und der Bruchzyklenzahlen im Dauerbiegeversuch, und der daraus resultierenden schlechten Vorhersagbarkeit der Lebensdauer anhand von Versuchen, nicht empfehlenswert.

Die asiatischen Fasern liegen in ihren Festigkeitseigenschaften und der Leistungsfähigkeit im Dauerbiegeversuch deutlich hinter den Fasern aus Dyneema® SK75 zurück. Hier ist ein Einsatz nur dann sinnvoll, wenn die wirtschaftlichen Sparpotentiale, die durch die deutlich niedrigeren Faserpreise generiert werden können, nicht durch die höhere Anzahl von Seilwechseln (im Vergleich zu Dyneema® Sk75) in der Anwendung reduziert oder durch Zusatzkosten aufgezehrt werden. In Anwendungen, bei denen der Bauraum kein kritischer Faktor ist, können bei geringfügiger Vergrößerung des Seildurchmessers mit den asiatischen Fasern zum Referenzseil aus Dyneema® SK75 identische Laufzeiten mit mäßiger Kosteneinsparung erzielt werden.

Eine generelle Kosteneinsparung in der Fertigung ist deutlich nachgewiesen worden, wobei die Kostenersparnis mit steigendem Seildurchmesser steigt, da für einen höheren Materialeinsatz kaum zusätzlicher Fertigungsaufwand entsteht. Eine Kostenbetrachtung ist in jeder nicht sicherheitsrelevanten Anwendung, oder in Anwendung ohne strikte Bauraumbegrenzung, in jedem Fall empfehlenswert. Für sicherheitstechnisch relevante Anwendungen gibt es unter den untersuchten Fasern keine Alternative zu Dyneema® SK75.

Durch die steigenden Kostenvorteile bei höheren Durchmessern sind die untersuchten asiatischen Fasern gerade im Bereich der großen Durchmesser als echte Alternative zu Stahldrahtseilen anzusehen, da vor allem die Gewichtsvorteile der Faserseile hier Potentiale zur Energieeinsparung oder zur Erhöhung der Nutzlast bei gleichbleibenden Sicherheitsfaktoren bieten. So beträgt das Metergewicht eines Faserseiles mit dem Durchmesser 12 mm ca. 0,083 kg/m, während ein Kranhubseil aus Stahl mit dem Durchmesser 12 mm ein Metergewicht von ca. 0,663 kg/m aufweist [Gru11]. Damit kann bei einer Seillänge von 100 Metern ein Gewichtsvorteil von ca. 650 kg erreicht werden, was eine Erhöhung der Nutzlast um mehr eine halbe Tonne pro Fördervorgang bedeutet.

7 Ausblick

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche konnten das Potential ausgewählter Fasern aus UHMW Polyethylen für technische Anwendungen aufzeigen. Dennoch sind, für ein besseres Verständnis des Verhaltens der Fasern unter verschiedenen Belastungen, weitere Versuche empfehlenswert.

Um detailliertere Erkenntnisse über das Verhalten der Fasern in Anwendungen mit Biegewechselbelastungen zu generieren, ist es empfehlenswert, die hier gezeigten Versuchsreihen der Dauerbiegeversuche durch zusätzliche Versuche bei geringeren und höheren Biegefrequenzen zu ergänzen. Damit wäre eine noch exaktere Abschätzung der Einsatzeignung für bestimmte technische Anwendungen möglich.

Eine weitere Variierung der Biegelänge ist ebenfalls nötig, vor allem für höhere Seilgeschwindigkeiten bzw. Biegefrequenzen, da die hier gezeigten Versuche eindeutig belegen, dass die geprüften Seilwerkstoffe ein unterschiedliches Verhalten in den Dauerbiegeversuchen mit variiertem Biegefrequenz zeigen und in den vorliegenden Untersuchungen eine Abhängigkeit von der Biegelänge nachgewiesen werden konnte.

Zusätzlich sind die hier an Seilen mit einem Nenndurchmesser von $d_N = 6$ mm erreichten Resultate an Seilen mit einem größeren Nenndurchmesser zu verifizieren, was später beim Übertragen der Ergebnisse für technische Anwendungen mit größeren Seildurchmessern hilfreich sein kann.

Wie die Ergebnisse zum Thermofixieren gezeigt haben, sind weitere Versuche vor allem hinsichtlich der optimalen Fixierkräfte und zu evtl. anderen optimalen Prozesszeiten durchzuführen. Dadurch bietet sich möglicherweise das Potential, besonders bei den preiswerteren Fasern höhere Festigkeitssteigerungen zu bewirken, was hinsichtlich der Austauschbarkeit zur weiteren Reduzierung der Kosten bei der Beschaffung von textilen Zugmitteln mit geeigneten mechanischen Eigenschaften führen kann. Zusätzlich ist der Einfluss der Thermofixierung auf die Lebensdauer in Dauerbiegeversuchen näher zu untersuchen. In der Literatur wird für Seile aus Dyneema SK 75 gezeigt, dass das Thermofixieren die Lebensdauer im Dauerbiegeversuch geringfügig verbessert [Hei13]. In weiteren Versuchen wäre zu untersuchen, ob die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Fasern ein ähnliches Verhalten zeigen.

Versuche zum Kriechverhalten an Garnen und Seilen sind durchzuführen, um relevante Unterschiede eventuell für technische Anwendungen gezielt nutzbar zu machen.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist, dass die asiatischen Fasertypen weniger kosten und weniger leisten als die Dyneema® SK75. Oft werden aber Dyneema® SK75 - Fasern mangels Alternativen in Anwendungen eingesetzt, in denen die Festigkeit hochfester Polyesterfasern (ca. 800 – 1000 MPa), welche deutlich günstiger (ca. 5 €/kg) sind, nicht ausreichend ist, die hohe Festigkeit von Dyneema® SK75 aber eigentlich nicht benötigt wird. Die asiatischen UHMW Polyethylenfasern könnten die Lücke zwischen preisgünstigen, hochfesten Polyesterfasern und den kostenintensiven UHMW Polyethylen-Fasern Dyneema® SK75 und Spectra® S1000 schließen.

Da der Fasermarkt im Sektor der UHMW Polyethylenfasern einer ständigen Wandlung unterliegt, werden neue Fasern auf dem Markt verfügbar werden. Zu diesen neu am Markt erschienenen (z.B. ICD Trevo 70® aus China oder MirAcle® aus Korea) und noch erscheinenden Fasern sind Untersuchungen in Analogie zu den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen nötig.

Ein weiterer Punkt ist die Untersuchung des Querschnittes der Einzelfilamente. Einzelne Vorversuche im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass eine höhere Festigkeit gepaart mit einem kreisförmigen Filamentquerschnitt nicht zwangsweise zur besten Lebensdauer im Dauerbiegeversuch führt. So wurden Dauerbiegeversuche an der von Teijin vertriebenen ENDUMAX® - Spaltfolie durchgeführt. Diese UHMW-Polyethylen-Spaltfolie wurde zu Seilen mit einer den gezeigten 6mm-Seilen sehr ähnlichen Konstruktion verarbeitet. Bei einer Ersatzspannung von 6% der Bruchspannung und einer Biegefrequenz von 20/min zeigten die Seile eine gegenüber der Fasern Dyneema® SK75 deutlich überlegene (ca. 95% höher) Lebensdauer.

Durch die Tatsache, dass die Seile aus ENDUMAX® etwas dünner als die üblichen Prüfseile waren, vergrößerte sich das Durchmesser Verhältnis auf $D/d = 14,8$, sodass die Ergebnisse nicht direkt vergleichbar sind. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung zeigen jedoch das Potential einer detaillierteren Untersuchung alternativer Faserquerschnitte.

8 Literaturverzeichnis

- [Alb35] Albert, W.A.J.: „Die Anfertigung von Treibseilen aus geflochtenem Eisendraht.“; Bergbau und Hüttenkunde, Band 8; Archiv für Mineralogie und Geognosie, Berlin, 1835
- [AST00] Norm: „ASTM D 6611:2000 – Standard Test Method for Wet and Dry Yarn-on-Yarn Abrasion Resistance“; American Society for Testing and Materials (ASTM International, West Conshohocken/USA, 2000
- [AST99] Norm: „ASTM D 3800:1999 – Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers“; ASTM International, West Conshohocken/USA, 1999
- [Bar00] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: „Werkstoffkunde“; 7. Auflage, ISBN: 3-540-66855-1; Axel Springer Verlag; 2000
- [Ber11] Berbig, I.; Michael, M. et. al.: „Schulung zum Faserseil“; Schulungsunterlage, Technische Universität Chemnitz; 2011
- [Bet98] Betz, S.; Hoffmann, M.; Lachmann, I.; Ramschütz, J.: „Technische Formeln“; ISBN 3-8174-7039-8; Compact Verlag München; 1998
- [Bön86] Bönigk, Burkhard, „Herstellung und Charakterisierung von Hochleistungsfäden aus ultrahochmolekularem Polyethylen nach dem Gelspinnverfahren“, Dissertation; Technische Universität Berlin; 1986
- [Cha95] Chau, C.C.; Blackson, J.; Im, J.: „Kink Bands and Shear Deformation polybenzobisoxazole fibres“, Polymer – The International Journal for the Science and Technology of Polymers, Vol. 36, Seite 2511-2516, ISSN: 0032-3861, 1995
- [Cos95] da Costa Mattos, H.S.; Alves, M.: „Modelling the creep behaviour of HMPE fibers used in ultra-deep-sea mooring ropes“; ISBN 978-85-85769-43-7; Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering; 2009
- [Cow97] Cowie, J.M.G.: „Chemie und Physik der synthetischen Polymeren“; ISBN 3-528-06616-4; Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1997
- [Dav11] Davies, P.; Reaud, Y.; Dussud, L.; Woerther, P.: „Mechanical behavior of HMPE fiber ropes for deep sea handling operations“; Ocean Engineering Vol. 38, ELSEVIER, 2011
- [DIN00] Norm: „DIN EN 10020:2000 – Begriffsbestimmung für die Einteilung der Stähle“; Beuth Verlag Berlin, 2000

-
- [DIN03] Norm: „DIN EN ISO 899-1:2003 – Kunststoffe - Bestimmung des Kriechverhaltens - Teil 1: Zeitstand-Zugversuch“; Beuth Verlag Berlin, 2003
- [DIN05] Norm: „DIN EN ISO 1968:2004 – Faserseile und Tauwerk“; Beuth Verlag Berlin, 2005
- [DIN10] Norm: „DIN EN ISO 2062:2010 – Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten - Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit“; Beuth Verlag Berlin, 2010
- [DIN11] Norm: „DIN EN ISO 2307:2011 – Faserseile - Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften“; Beuth Verlag Berlin, 2011
- [DIN99] Norm: „DIN EN ISO 13431:1999 – Geotextilien und geotextilverwandte Stoffe - Bestimmung des Zugkriech- und des Zeitstandbruchverhaltens“; Beuth Verlag Berlin, 1999
- [Det67] Determann, H.: „Gelchromatographie“; ISBN 9783540037583; Springer Verlag Berlin, 1967
- [Dom05] Domininghaus, H.: „Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften“, 6. Auflage; ISBN 3540214100; Springer Verlag Berlin, 2005
- [Dyn07] N.N.: „Dyneema® product data sheet“ (PDS-YA100); DSM Dyneema®; Urmond/Niederlande; 2007
- [Dyn08] N.N.: „Dyneema® customer information sheet“ (CIS-YA100); DSM Dyneema®; Urmond/Niederlande; 2007
- [Ehr03] Ehrenstein, G.W.: „Praxis der thermischen Analyse von Kunststoffen“, 2. Auflage; ISBN 978-3446223400; Hanser Verlag, 2003
- [Eid13] Eidner, F.: „Langzeittemperaturstabilität von geflochtenen Seilen aus ultrahochmolekularem Polyethylen“; Bachelor-Arbeit; Technische Universität Chemnitz, 2013
- [Eli80] Elias H.-G.: „Polymere. Von Monomeren und Makromolekülen zu Werkstoffen“; ISBN 3-85739-125-1; Hüthig & Wepf Verlag, Freiberg am Neckar, 1996
- [Fey00] Feyrer, K.: „Drahtseile - Bemessung, Betrieb, Sicherheit“; ISBN: 9783540678298; Springer Verlag, Berlin, 2000

-
- [Fey11] Feyrer, K.: „Die Lebensdauer laufender Drahtseile unter dem Größeneinfluss“; Lift Report Ausgabe 1/2011; VFZ-Verlag, Dortmund, 2011
- [Geb11] Gebrauchsmuster DE 20 2011 052 162 U1: „Faserstruktur-Abrasions-Prüfstand“; Anmeldung: 01.12.2011; Schutzrechtinhaber: Technische Universität Chemnitz
- [Geh98] Gehm, L.: „Rheologie: Praxisorientierte Grundlagen und Glossar“; ISBN 3878704496; Vincentz Network; 1998
- [Geo10] Geo. Glestein & Sohn GmbH (Glestein Ropes): „Angebot V-AN10-1353 (Kauf von Faserseilen)“; 03.05.2010, Bremen
- [Gru11] Gruber, Boris: „Katalog“, Boris Gruber Seilhandel, Rot an der Rot, Deutschland; Stand: 09/2011; www.gruberseilundhebetchnik.de
- [Gup05] Gupta, A: „Improving UV resistance of high strength fibers“, master thesis; North Carolina State University; Raleigh, North Carolina/USA; 2005
- [Hea01] Hearle, J.W.S. et. al. „High-Performance Fibres“; ISBN 1885735393; Woodhead Publishing, Cambridge/UK, 2001
- [Hei11] Heinze, T.: „Lebensdaueruntersuchungen an hochfesten Faserseilen – Dimensionieren je nach Einsatzfall“, Hebezeuge Fördermittel, Ausgabe 06/2011, Seite 366-369, ISSN 0017-9442, HUSS-MEDIEN GmbH Berlin, 2011
- [Hei13] Heinze, T.: „Zug- und biegewechselbeanspruchte Seilgeflechte aus hochfesten Polymerfasern“; Dissertation, Technische Universität Chemnitz; 2013
- [HeM11] Heinze, T.; Mammitzsch, J.: „Thermofixieren von Seilen aus hochfesten Synthesefasern“; Logistics e-Journal, ISSN 1860-5923, 2011
- [ISO10] Norm: „DIN EN ISO 11357-1 : Kunststoffe – Dynamische Differenz-Thermoanalyse (DSC) – Teil 1: Grundlagen“; Beuth Verlag Berlin, 2010
- [Jac99] Jacobs, M.: „Creep of gel-spun polyethylene fibers: Improvements by impregnation and crosslinking“; Dissertation; ISBN 90-386-2741-6; Technische Universität Eindhoven, 1999
- [Kan83] Kanamoto, T.; Tsuruta, A.; Tanaka K.; Takeda M.; Porter, R.S.: „On Ultra-High Tensile Modulus by Drawing Single Crystal Mats of High Molecular Weight Polyethylene“; Polymer Journal; Vol. 15, S.327-329; Nature Publishing Group; Tokyo/Japan; 1983

-
- [Kur13] Kurtz, P.; Heinze, T.; Michael, M.: „Neue Generation von Aufzügen mit Faserseil“; Logistics e-Journal; ISSN 2192-9084, 2013
- [Lec03] Lechner, M.D.; Gehrke, K.; Nordmeier, E.H.: „Makromolekulare Chemie“, 3. Auflage; ISBN 3-7643-6952-3; Birkhäuser Verlag, Basel, 2003
- [Loh13] Lohrengel, A.; Stahr, K.; Wächter, M.: „Simulation of fibre ropes and their effects on the strain scenario of multi-layer wound rope drums“, OIPEEC Conference 2013, Oxford/UK, 2013
- [MaH14] Mammitzsch, J.; Heinze, T.; Michael, M.: „Mechanical Behavior of High Performance Fiber Ropes in Technical Applications“; SAMPE Tech Seattle 2014; Seattle/USA, 2014
- [Mam12] Mammitzsch, J.; Heinze, T.: „Weathering tests on HM-PE kite lines“, 3rd International Fiber Applications Conference; Amsterdam/Niederlande, 04.12.2012
- [Mam14] Mammitzsch, J.; Kern, C.: „Potentials of Thermosetting for Increasing the Strength of HMPE Fibre Ropes“ 4th International Fiber Applications Conference; Antwerpen/Belgien, 2014
- [MaR12] Mammitzsch, J.; Reimann, N.; Pelster, M.: „Witterungsbeständigkeit von Seilen aus hochfesten Polymerfasern“; Tagungsband zum 5. Fachkolloquium InnoZug, S.13fff; ISBN 978-3-9812554-8-5; Technische Universität Chemnitz, 2012
- [McK04] McKenna, H.A.; Hearle, J.W.S.; O’Hear, N.: „Handbook of fibre rope technology“; ISBN: 1855736063; Woodhead Publishing, Cambridge/UK; 2004
- [Mic10] Michael, M.: „Beitrag zur Treibfähigkeit von hochfesten, synthetischen Faserseilen“; Dissertation; Technische Universität Chemnitz; 2010
- [Mic12] Michael, M.: „Entwicklungsziele der Stiftungsprofessur Technische Textilien – Textile Maschinenelemente“; Plenarvortrag zum 5. Fachkolloquium InnoZug; Technische Universität Chemnitz, 2012
- [Mic13] Michael, M.; Kurtz, P.; Hillig, R.; Mammitzsch, J.: „Optimization of mechanical properties of HMPE fiber ropes by thermosetting“ TexComp11; Leuven/Belgien, 2013

- [Min54] Minc, D.M.: „Sedimentation (Absetzen) konzentrierter Suspensionen“; Chimičeskaja promyšlennost, Nr. 1, S33-36; 1954 (deutsche Übersetzung)
- [Nen09] Nendel, K.; Mammitzsch, J.; Kunz, M.; Michael, M.: „Anwendungsspezifische Beschichtungen für Faserseile im Maschinenbau“; 12. Chemnitzer Textiltechnik-Tagung; Tagungsband S.199; Chemnitz, 2009
- [Pat02] Patentschrift EP1193335A1: „High-Strength Polyethylene Fiber and Process for Producing the same“; Anmeldungsjahr: 2002; Patentinhaber: DSM N.V.; Niederlande
- [Pat05] Patentschrift WO2006/124054A2: „Drawn Gel-spun Yarns and Process for Drawing“; Anmeldungsjahr: 2005; Patentinhaber: Honeywell International Inc.; USA
- [Pat08] Patentschrift EP1193335A1: „A Process for Preparing Ultra High Molecular Weight Polyethylene Fibres“; Anmeldungsjahr: 2008; Patentinhaber: Sinotex Investment & Development Co. Ltd.; China
- [Reu69] Reuther, H.: „Silikone–Ihre Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten“, 2. Auflage; Verlag Theodor Steinkopf, Dresden, 1969
- [Rob69] Robertson, R. E.: „Formation of Kink Bands in Oriented Polymers“, Journal of Polymer Science, Part A-2, Vol 7, ISSN 1099-0518, 1969
- [Sac07] Sachs, L.; Heddering, J.: „Angewandte Statistik“, 12. Auflage; ISBN 978-3-540-32160-6; Springer Verlag Berlin; 2007
- [Sch01] Schubnell, M.: „Bestimmung der Kristallinität bei Polymeren aus DSC-Messungen“; Mettler Toledo Deutschland; de.mt.com; Stand: Juni 2014
- [Sta04] N.N.: „Stahlschlüssel – Taschenbuch“, 20. Auflage; ISBN: 3-922599-19-2; Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH, Marbach am Neckar, 2004
- [Tec09] N.N.: „General Datasheet Technora®“; Teijin Aramid B.V.; Arnhem/Niederlande, 2009
- [Tom90] Tomanek, A.: „Silikone und Technik“; ISBN 9783446160323; Hanser Verlag, München, 1990
- [Twa09] N.N.: „General Datasheet Twaron®“; Teijin Aramid B.V.; Arnhem/Niederlande, 2009
- [Vas02] Vasile, C.: „Handbook of Polyolefins“; 2. Auflage, ISBN 978-0824786038; Taylor & Francis / CRC Press, Boca Raton (USA); 2002

-
- [VDI84] Richtlinie: „VDI 2358 – Drahtseile für Fördermittel“; Verein Deutscher Ingenieure (VDI); VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 1984
- [Vec12] N.N.: „Brochure & Product Information Vectran®“; Internetpräsenz zu Vectran®-Fasern, <http://www.vectranfiber.com>; Stand Dezember 2012
- [Völ06] Völker, U.; Brückner, K.: „Von der Faser zum Stoff: Textile Werkstoff- und Warenkunde“; 33. Auflage, ISBN 978-3582051127; Verlag Handwerk und Technik; Hamburg; 2006
- [Wac01] N.N.: „Wacker Silikonöle AK“; Datenblatt der Wacker Chemie GmbH zu Silikonölen, Nr. 4405 1.02; München, Stand 2001
- [Wol83] Wolbrig, P.: „Herstellung und Charakterisierung hochorientierter Polyethylenterephthalat-Filamente“, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 1983
- [Yan92] Yang, H.H.: „Kevlar Aramid fibres“; ISBN: 0471937657; John Wiley & Sons, Chichester/UK; 1992
- [Zha03] Zhang, H.; Shi, M.; Zhang, J.; Wang, S.: „Effects of Sunshine UV Irradiation on the Tensile Properties and Structure of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Fiber“; Journal of Applied Polymer Science, Vol. 98; John Wiley & Sons, Chichester/UK; 2003
- [Zwi76] Zwijnenburg, A.; Pennings, A.J.: „Longitudinal growth of polymer crystals from flowing solutions III. Polyethylene crystals in Couette flow“; Colloid & Polymer Science, issue 254, pages 868 - 881; Dr. Dietrich Steinkopff Verlag GmbH & Co. KG, Darmstadt, 1976
- [Zyl05] N.N.: „PBO Fiber Zylon® – Technical Information“; Toyobo Co. Ltd.; Osaka/Japan 2005

9 Anlagen

Nr.		Seite
Anlage I	Protokolle der Zugversuche an Garnen aus UHMW Polyethylen	I-1
Anlage II	Protokolle der Zugversuche an Seilen aus UHMW Polyethylen im Lieferzustand	II-1
Anlage III	Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Dyneema® SK75 nach dem Thermofixieren	III-1
Anlage IV	Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Spectra® S1000 nach dem Thermofixieren	IV-1
Anlage V	Protokolle der Zugversuche an Seilen aus TNX® nach dem Thermofixieren	V-1
Anlage VI	Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Eosten® FT093 nach dem Thermofixieren	VI-1
Anlage VII	Kalibrierkurven zur Gel-Permeations-Chromatographie	VII-1

Anlage I: Protokolle der Zugversuche an Garnen aus UHMW Polyethylen



Zugversuch

Prüfdatum : 10.12.2013
Auftraggeber : Mammitzsch
Prüfer : Liebold/Schneevoigt
Prüfnorm : angelehnt an DIN EN ISO 2062
Prüfmaschine : Zwick ZMART.PRO Z1464
Klemmentyp : UK Zwick 8397.04

Kraftaufnehmer : 50 kN
Wegaufnehmer : TW
Material : Dyneema SK75
Bemerkung : Klemmendruck 6 bar
Dateiname Kurve : Dyneema SK75_

Vorkraft : 0,5 cN/tex
Prüfgeschwindigkeit : 500 mm/min
Einspannlänge bei Startposition : 800,00 mm

Prüfergebnisse:

Nr	Titer dtex	F _H cN	R _H cN/tex	ε _H %
1	1800	55100	306	2,85
2	1800	55300	307	2,78
3	1800	56300	313	2,87
4	1800	54200	301	2,80
5	1800	59400	330	3,08
6	1800	58100	323	3,07
7	1800	57200	318	2,94
8	1800	56400	313	2,89
9	1800	56500	314	2,94
10	1800	53700	298	2,70



Zugversuch

Prüfdatum : 10.12.2013
Auftraggeber : Mammitzsch
Prüfer : Liebold/Schneevoigt
Prüfnorm : angelehnt an DIN EN ISO 2062
Prüfmaschine : Zwick ZMART.PRO Z1464
Klemmentyp : UK Zwick 8397.04

Kraftaufnehmer : 50 kN
Wegaufnehmer : TW
Material : Spectra S1000
Bemerkung : Klemmendruck 6 bar
Dateiname Kurve : Spectra S1000_

Vorkraft : 0,5 cN/tex
Prüfgeschwindigkeit : 500 mm/min
Einspannlänge bei Startposition : 800,00 mm

Prüfergebnisse:

Nr	Titer dtex	F _H cN	R _H cN/tex	ε _H %
1	1800	55300	307	2,61
2	1800	56600	315	2,78
3	1800	52900	294	2,57
4	1800	57100	317	2,82
5	1800	58100	323	2,94
6	1800	53900	299	2,81
7	1800	54100	300	2,76
8	1800	54200	301	2,85
9	1800	56100	312	3,08
10	1800	51600	287	2,55



Zugversuch

Prüfdatum	: 10.12.2013	Kraftaufnehmer	: 50 kN
Auftraggeber	: Mammitzsch	Wegaufnehmer	: TW
Prüfer	: Liebold/Schneevoigt	Material	: EOSTEN FT093
Prüfnorm	: angelehnt an DIN EN ISO 2062	Bemerkung	: Klemmendruck 6 bar
Prüfmaschine	: Zwick ZMART.PRO Z1464	Dateiname Kurve	: EOSTEN FT093_
Klemmentyp	: UK Zwick 8397.04		
Vorkraft	: 0,5 cN/tex		
Prüfgeschwindigkeit	: 500 mm/min		
Einspannlänge bei Startposition	: 800,00 mm		

Prüfergebnisse:

Nr	Titer dtex	F _H cN	R _H cN/tex	ε _H %
1	1800	48000	267	2,95
2	1800	48400	269	2,82
3	1800	50400	280	3,04
4	1800	50400	280	3,07
5	1800	54300	302	3,32
6	1800	50000	278	2,96
7	1800	49700	276	3,04
8	1800	48200	268	2,81
9	1800	53500	297	3,27
10	1800	50000	278	3,04



Zugversuch

Prüfdatum	: 10.12.2013	Kraftaufnehmer	: 50 kN
Auftraggeber	: Mammitzsch	Wegaufnehmer	: TW
Prüfer	: Liebold/Schneevoigt	Material	: TNX
Prüfnorm	: angelehnt an DIN EN ISO 2062	Bemerkung	: Klemmendruck 6 bar
Prüfmaschine	: Zwick ZMART.PRO Z1464	Dateiname Kurve	: TNX_
Klemmentyp	: UK Zwick 8397.04		
Vorkraft	: 0,5 cN/tex		
Prüfgeschwindigkeit	: 500 mm/min		
Einspannlänge bei Startposition	: 800,00 mm		

Prüfergebnisse:

Nr	Titer dtex	F _H cN	R _H cN/tex	ε _H %
1	1800	44700	248	2,75
2	1800	49100	273	3,06
3	1800	54000	300	3,35
4	1800	51100	284	3,07
5	1800	46700	260	2,72
6	1800	50900	283	3,08
7	1800	49400	275	3,14
8	1800	53000	294	3,32
9	1800	48500	270	2,99
10	1800	47200	262	2,87

Prüfbericht

Prüfung : Zugversuch
 Maschinentyp : inspekt 10
 Kraftmesszelle : 10 KN
 Probenhalter : 8397
 Prüfer : Grunert
 Auftraggeber : Herr Mammitsch

Material :
 Einspannlänge : 1000 mm
 Vorkraft : 320cN (2cN/tex)
 Testgeschwindigkeit : 250 mm/min
 Prüfdatum : 26.06.2012
 Sonstiges : Klemmenabstand 260mm

F_{max} = Maximalkraft (global)
 Δl F_m = Verformung

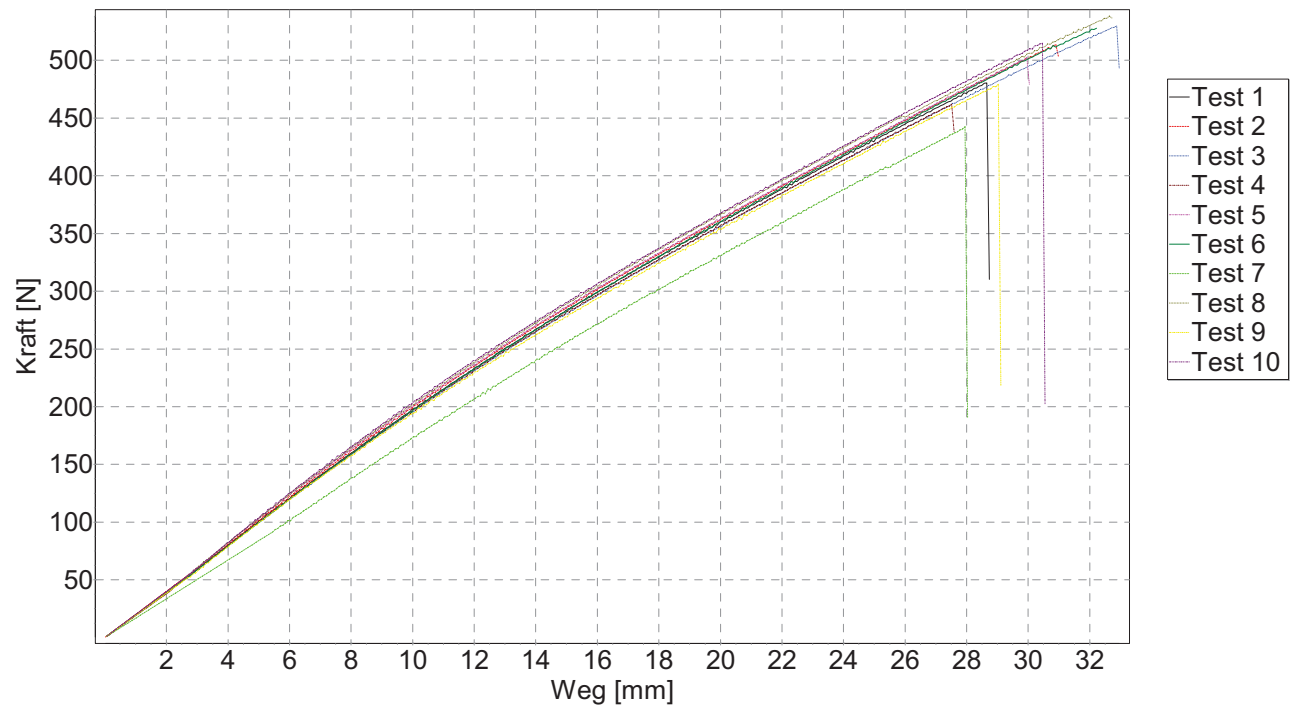
ϵ_m = Dehnung bei Zugfestigkeit

Resultate TNX Zusatz 1:

Name	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ϵ_m [%]
Test 1	480,320	28,653	2,864
Test 2	513,500	30,901	3,071
Test 3	529,890	32,875	3,288
Test 4	462,090	27,512	2,751
Test 5	502,750	29,954	2,995
Test 6	527,900	32,222	3,221
Test 7	442,430	27,946	2,795
Test 8	538,370	32,634	3,263
Test 9	479,270	29,025	2,903
Test 10	514,770	30,463	3,046

Statistik Dyneema 2:

	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ϵ_m [%]
MW	499,129	30,218	3,02
s	31,821	1,94	0,193
V	6,375	6,419	6,4
ANZ	10	10	10



Prüfbericht

Prüfung : Biegeversuch
 Maschinentyp : inspekt 10
 Kraftmesszelle : 10 KN
 Probenhalter : 8397
 Prüfer : Grunert
 Auftraggeber : Herr Mammitsch

Material :
 Einspannlänge : 1000 mm
 Vorkraft : 320cN (2cN/tex)
 Testgeschwindigkeit : 250 mm/min
 Prüfdatum : 26.06.2012
 Sonstiges : Klemmenabstand 260mm

F_{max} = Maximalkraft (global)
 Δl F_m = Verformung

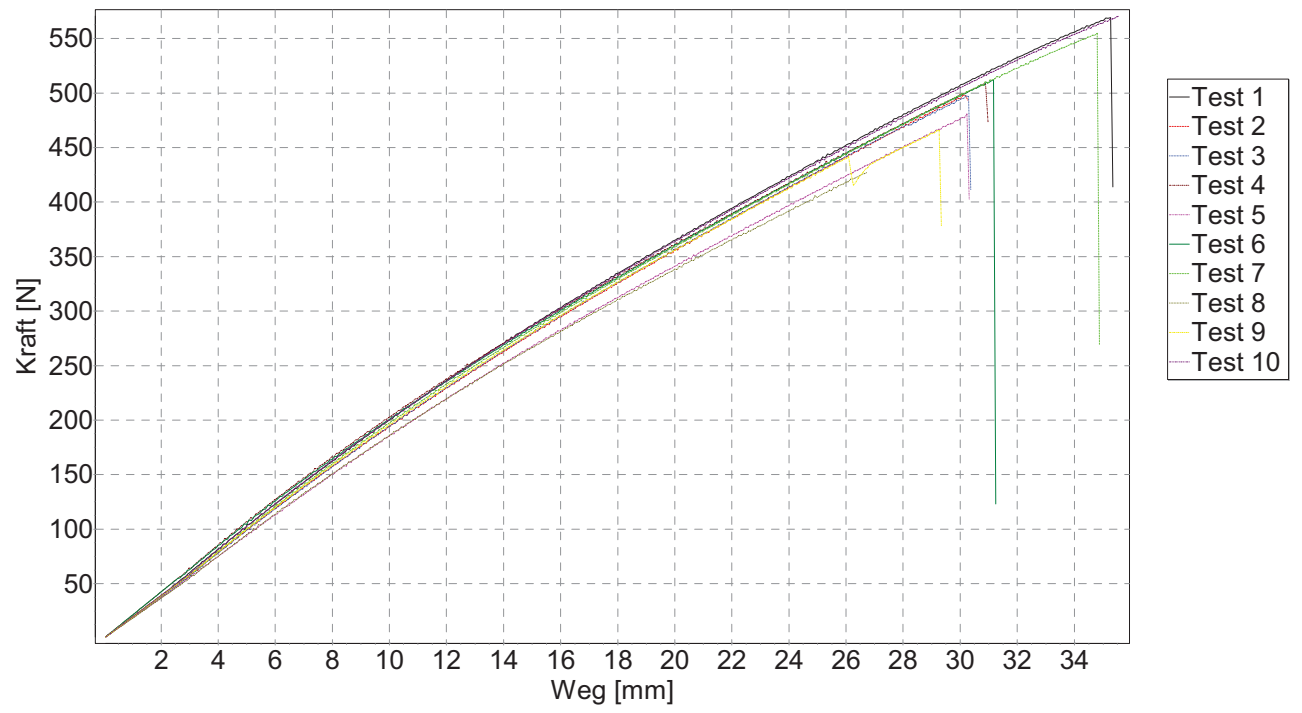
ε_m = Dehnung bei Zugfestigkeit

Resultate TNX Zusatz 2:

Name	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ε _m [%]
Test 1	569,110	35,270	3,527
Test 2	498,210	30,100	3,010
Test 3	497,270	30,207	3,019
Test 4	508,620	30,892	3,089
Test 5	480,820	30,235	3,022
Test 6	512,170	31,164	3,116
Test 7	554,770	34,796	3,478
Test 8	427,470	26,746	2,675
Test 9	465,860	29,260	2,924
Test 10	570,660	35,575	3,557

Statistik Dyneema 3:

	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ε _m [%]
MW	508,496	31,424	3,142
s	46,036	2,886	0,289
V	9,053	9,184	9,185
ANZ	10	10	10



Prüfbericht

Prüfung : Zugversuch
 Maschinentyp : inspekt 10
 Kraftmesszelle : 10 kN
 Probenhalter : 8397
 Prüfer : Grunert
 Auftraggeber : Herr Mammitsch

Material :
 Einspannlänge : 1000 mm
 Vorkraft : 320cN (2cN/tex)
 Testgeschwindigkeit : 250 mm/min
 Prüfdatum : 26.06.2012
 Sonstiges : Klemmenabstand 260mm

F_{max} = Maximalkraft (global)
 Δl F_m = Verformung

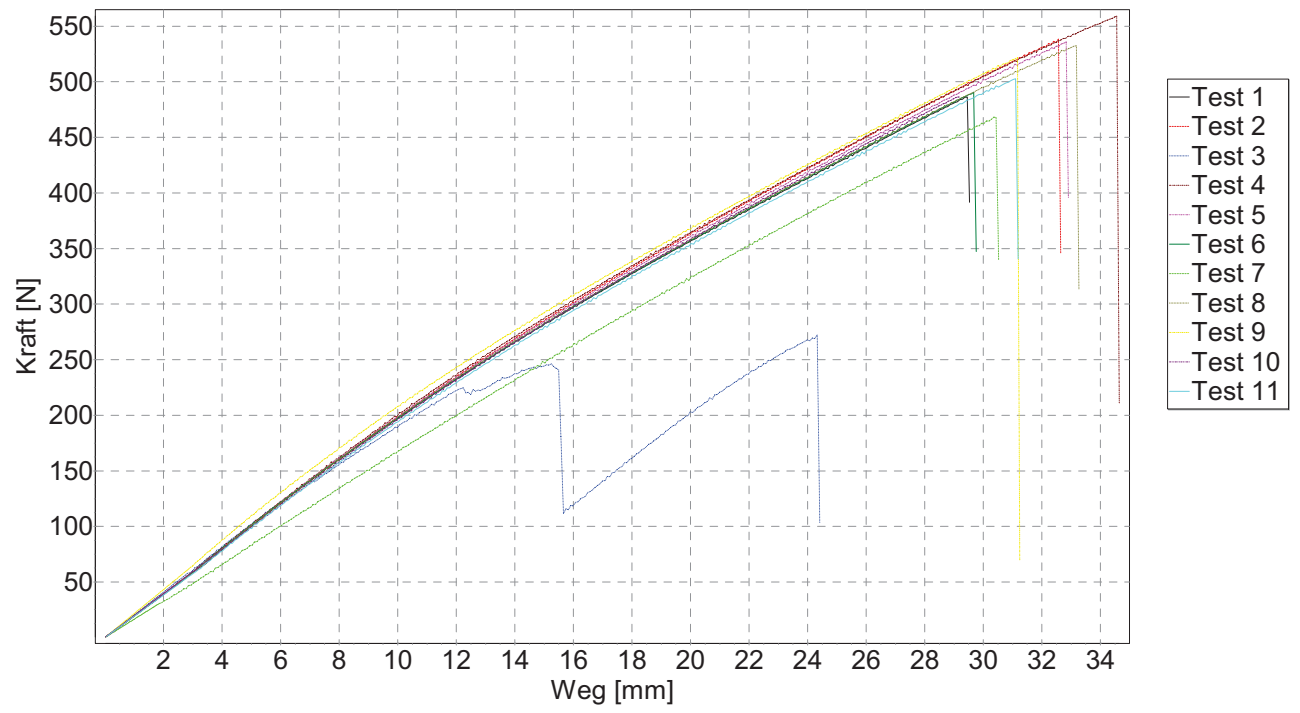
ε_m = Dehnung bei Zugfestigkeit

Resultate TNX Zusatz 3:

Name	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ε _m [%]
Test 1	486,190	29,453	2,945
Test 2	538,480	32,566	3,254
Test 3	272,310	24,329	2,433
Test 4	559,090	34,562	3,455
Test 5	535,660	32,829	3,281
Test 6	490,620	29,673	2,953
Test 7	468,080	30,360	3,036
Test 8	532,440	33,181	3,301
Test 9	521,700	31,168	3,114
Test 10	486,410	29,219	2,910
Test 11	502,750	31,107	3,109

Statistik Dyneema 4:

	F _{max} [N]	Δl F _m [mm]	ε _m [%]
MW	490,339	30,768	3,072
s	77,507	2,737	0,273
V	15,807	8,897	8,887
ANZ	11	11	11



Prüfbericht

Prüfung : Zugversuch
 Maschinentyp : inspekt 10
 Kraftmesszelle : 10 KN
 Probenhalter : 8397
 Prüfer : Grunert
 Auftraggeber : Herr Mammitsch

Material :
 Einspannlänge : 1000 mm
 Vorkraft : 320cN (2cN/tex)
 Testgeschwindigkeit : 250 mm/min
 Prüfdatum : 26.06.2012
 Sonstiges : Klemmenabstand 260mm

Fmax = Maximalkraft (global)
 Δl Fm = Verformung

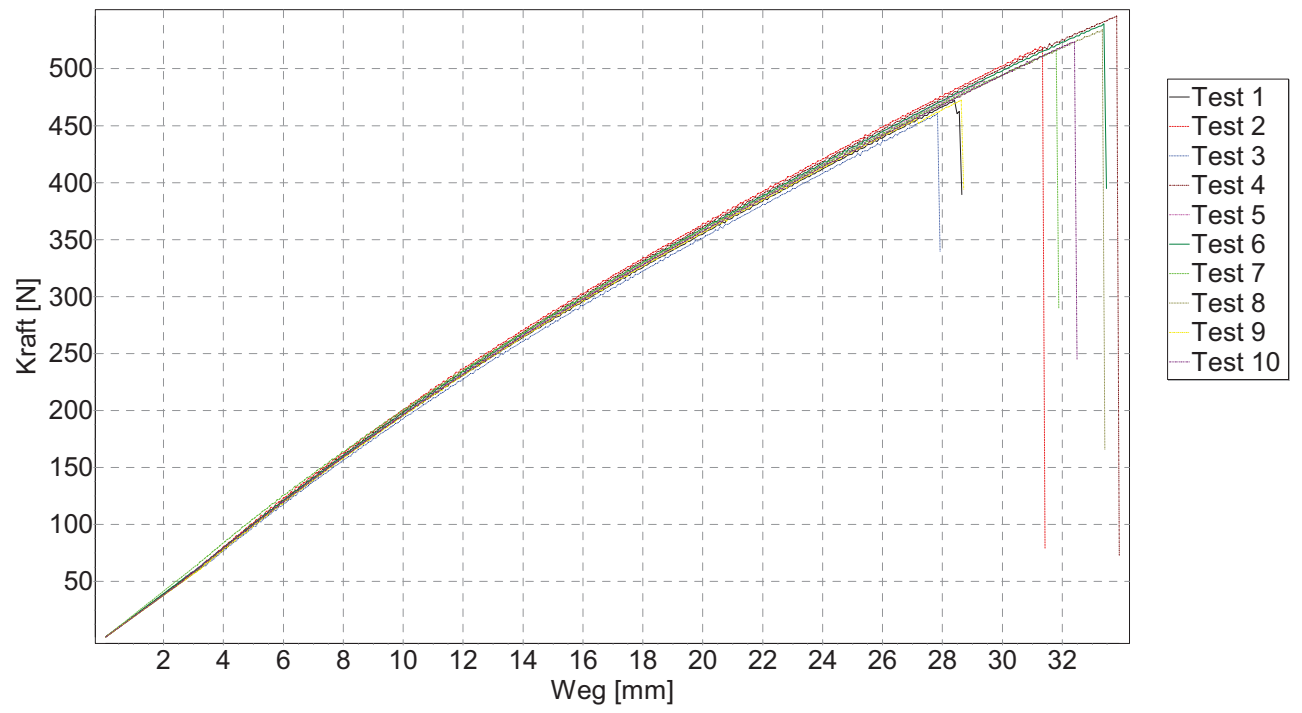
ϵ_m = Dehnung bei Zugfestigkeit

Resultate TNX Zusatz 4:

Name	Fmax [N]	Δl Fm [mm]	ϵ_m [%]
Test 1	472,230	28,398	2,840
Test 2	519,430	31,258	3,126
Test 3	460,870	27,837	2,783
Test 4	546,180	33,818	3,381
Test 5	489,070	29,384	2,938
Test 6	539,530	33,389	3,338
Test 7	515,940	31,794	3,178
Test 8	534,160	33,334	3,332
Test 9	472,400	28,626	2,861
Test 10	523,520	32,409	3,241

Statistik Dyneema 5:

	Fmax [N]	Δl Fm [mm]	ϵ_m [%]
MW	507,333	31,025	3,102
s	31,078	2,28	0,228
V	6,126	7,35	7,348
ANZ	10	10	10



Anlage II: Protokolle der Zugversuche an Seilen aus UHMW Polyethylen im
Lieferzustand

Protokoll Zugversuch Seil

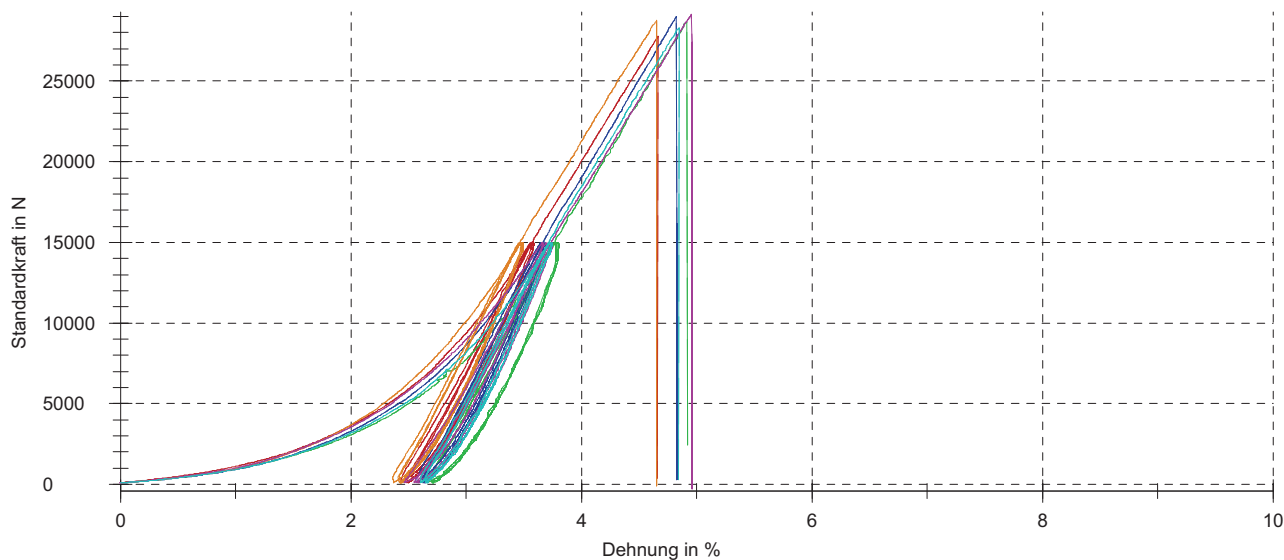
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probenotyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : unbehandelt
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	Hinweis	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	SK75	TUC	Lieferzustand	27800	19,7	92,24	423,3	Bruch an linker Abbaurolle - 1 Litze OK
■	2	SK75	TUC	Lieferzustand	28700	20,0	91,28	406,4	Bruch an rechter Abbaurolle
■	3	SK75	TUC	Lieferzustand	29000	20,5	93,52	425,3	Bruch an rechter Abbaurolle - 1 Litze OK
■	5	SK75	TUC	Lieferzustand	28800	19,8	92,83	425,5	Bruch an linker Abbaurolle
■	6	SK75	TUC	Lieferzustand	29100	21,0	95,15	424,0	Bruch an rechter Abbaurolle
■	7	SK75	TUC	Lieferzustand	28300	20,6	92,04	425,3	Bruch an rechter Abbaurolle - 1 Litze OK

Seriengrafik:



Statistik:

SK75 n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	28600	20,3	92,84	421,7
s	507	0,5	1,36	7,5
v	1,77	2,51	1,46	1,78

Protokoll Zugversuch Seil

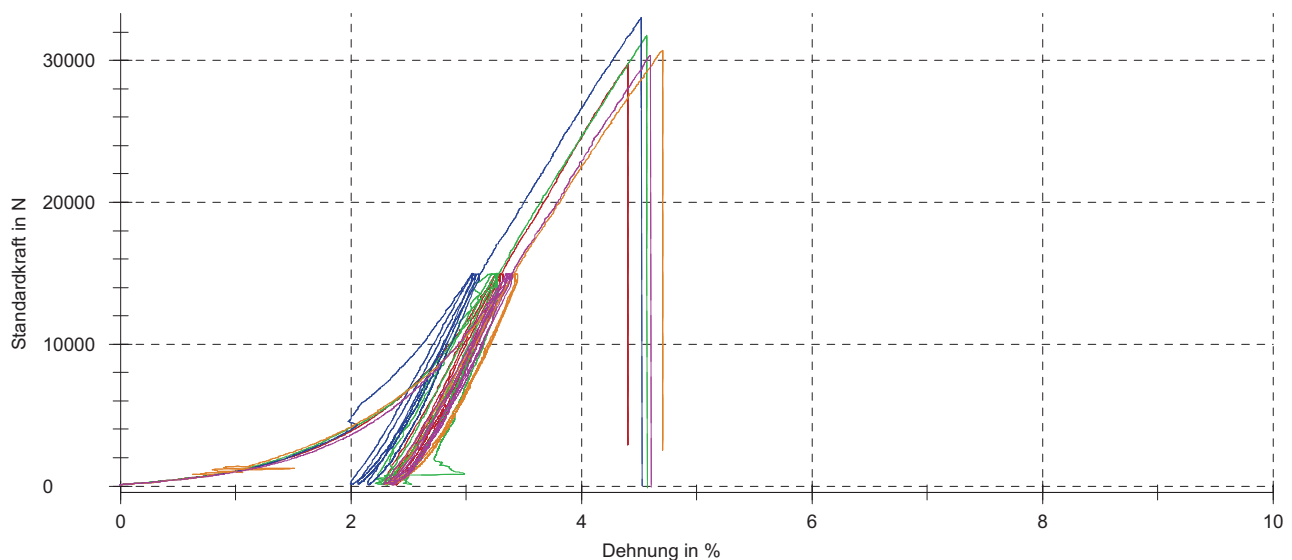
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000, UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard SK75 (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : unbehandelt
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	Hinweis	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	S1000	TUC	Lieferzustand	29800	19,1	101,17	434,1	Bruch an linker Abbaurolle - 1 Litze OK
■	2	S1000	TUC	Lieferzustand	31700	20,7	101,13	453,0	Bruch an linker Abbaurolle
■	3	S1000	TUC	Lieferzustand	33000	19,7	102,71	435,5	Bruch an linker Abbaurolle
■	4	S1000	TUC	Lieferzustand	30700	20,2	105,64	428,5	Bruch an linker Abbaurolle
■	5	S1000	TUC	Lieferzustand	30400	20,1	101,92	436,2	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra S1000 n = 5	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
x	31100	19,9	102,51	437,4
s	1280	0,6	1,86	9,2
v	4,11	2,95	1,82	2,10

Protokoll Zugversuch Seil

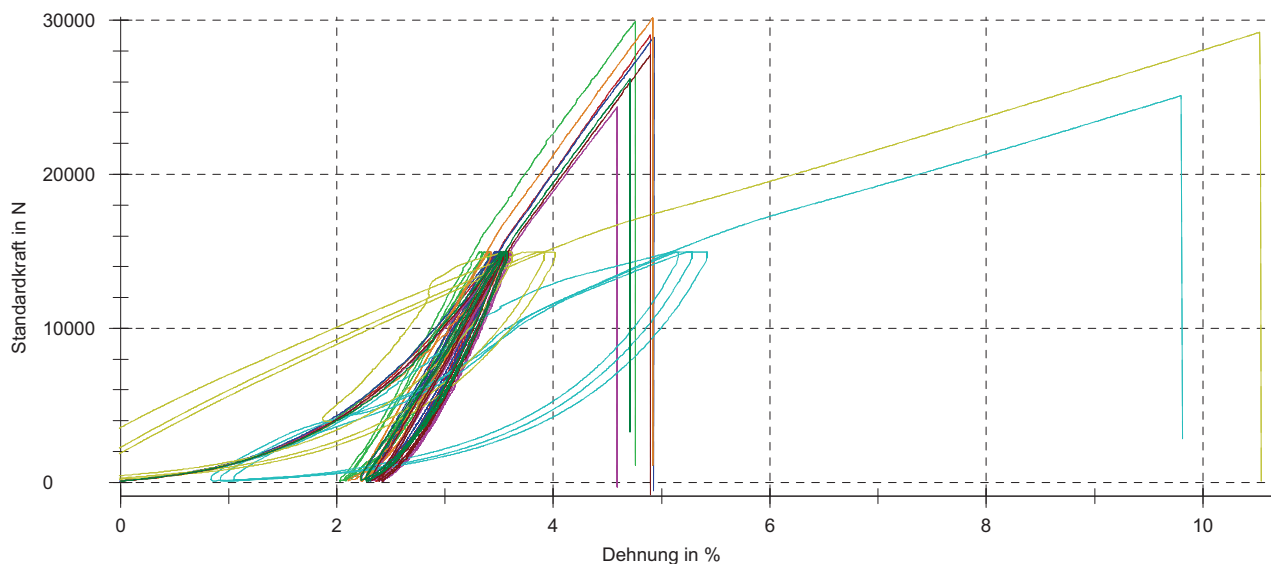
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probestyp : 6mm-Seil, nach Standard SK75 (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : unbehandelt
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	Hinweis	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	Lieferzustand	29000	21,7	108,42	442,3	Bruch an linker Abbaurolle
	2	TNX	TUC	Lieferzustand	29900	21,6	104,79	454,1	Bruch an linker Abbaurolle
	3	TNX	TUC	Lieferzustand	28900	22,5	105,54	457,3	Bruch an rechter Abbaurolle
	4	TNX	TUC	Lieferzustand	30200	22,3	106,74	453,4	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	TNX	TUC	Lieferzustand	24400	21,3	99,53	464,2	Bruch an linker Abbaurolle
	6	TNX	TUC	Lieferzustand	25100	44,3	99,77	451,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	TNX	TUC	Lieferzustand	29200	47,0	102,73	447,0	Bruch an linker Abbaurolle
	8	TNX	TUC	Lieferzustand	27800	21,9	101,38	446,0	Bruch an linker Abbaurolle
	9	TNX	TUC	Lieferzustand	26200	22,4	97,60	474,6	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 9	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	27800	27,2	102,94	454,5
s	2140	10,5	3,66	10,0
v	7,67	38,53	3,56	2,19

Protokoll Zugversuch Seil

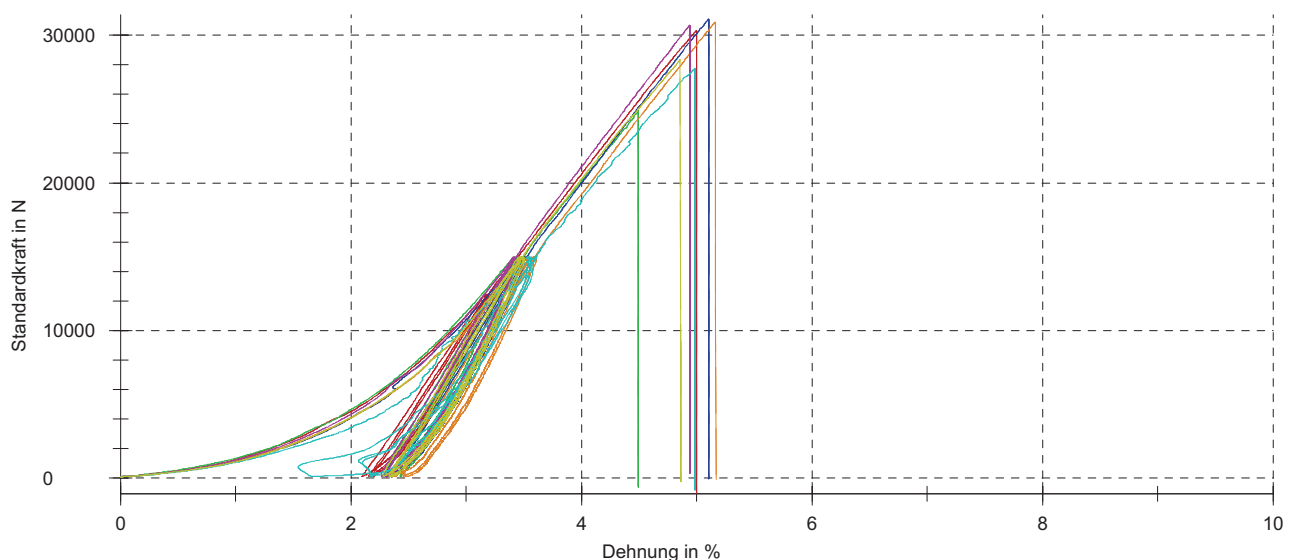
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Eosten FT093 UHMW-PE
Probestyp : 6mm-Seil, nach Standard SK75 (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : unbehandelt
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	Hinweis	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Eosten	TUC	Lieferzustand	30300	25,3	103,47	505,1	Bruch an linker Abbaurolle
■	2	Eosten	TUC	Lieferzustand	24900	22,1	101,85	491,2	Bruch an linker Abbaurolle
■	3	Eosten	TUC	Lieferzustand	31100	26,0	106,04	510,0	Bruch an linker Abbaurolle
■	4	Eosten	TUC	Lieferzustand	30900	25,3	105,26	489,5	Bruch an rechter Abbaurolle
■	5	Eosten	TUC	Lieferzustand	30700	24,3	105,95	491,6	Bruch an linker Abbaurolle
■	6	Eosten	TUC	Lieferzustand	27700	24,2	103,93	485,6	Bruch an linker Abbaurolle
■	7	Eosten	TUC	Lieferzustand	28400	21,6	100,70	444,2	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Eosten n = 7	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	29100	24,1	103,89	488,2
s	2280	1,7	2,05	21,3
v	7,82	6,95	1,98	4,37

Anlage III: Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Dyneema® SK75 nach dem
Thermofixieren

Protokoll Zugversuch Seil

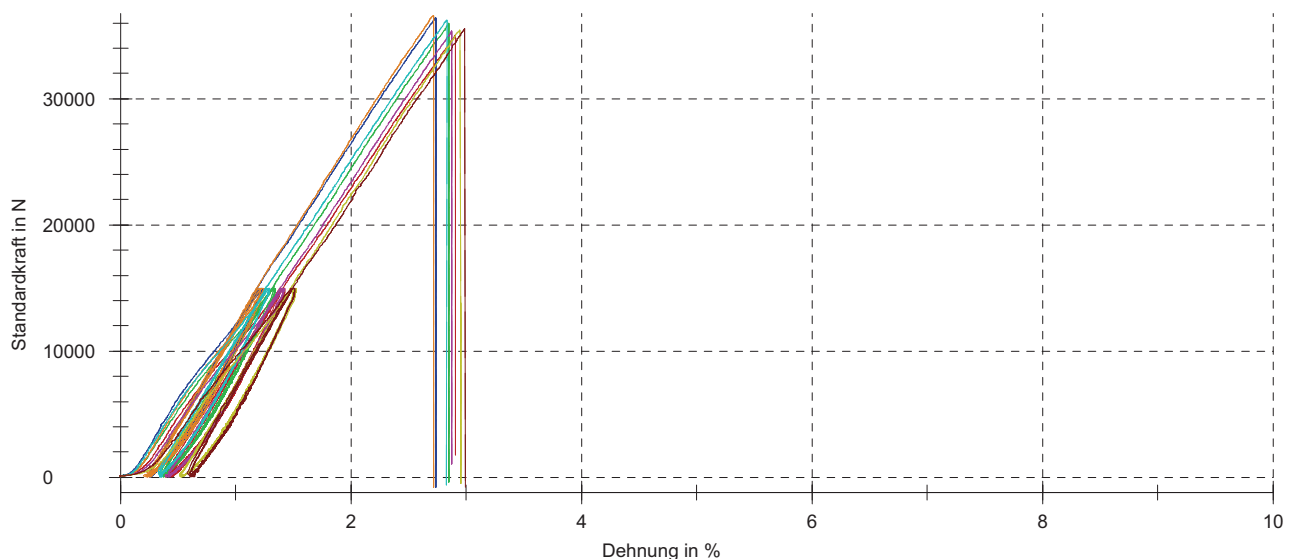
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 130°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	Dyneema SK75	TUC	35100	12,3	85,37	421,4	Bruch an rechter Einspannung - ungültig
	2	Dyneema SK75	TUC	36000	12,1	86,62	424,8	Bruch an linker Abbaurolle
	3	Dyneema SK75	TUC	36400	11,5	86,05	421,0	Bruch an rechter Abbaurolle
	4	Dyneema SK75	TUC	36600	11,3	87,36	414,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	Dyneema SK75	TUC	35400	12,2	87,70	422,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	Dyneema SK75	TUC	36200	11,7	88,93	411,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	Dyneema SK75 (2)	TUC	35500	13,0	75,61	439,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	8	Dyneema SK75 (2)	TUC	35500	13,0	74,39	433,9	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Dyneema n = 8	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	35800	12,1	84,00	423,7
s	551	0,6	5,67	9,3
v	1,54	5,19	6,75	2,19

Protokoll Zugversuch Seil

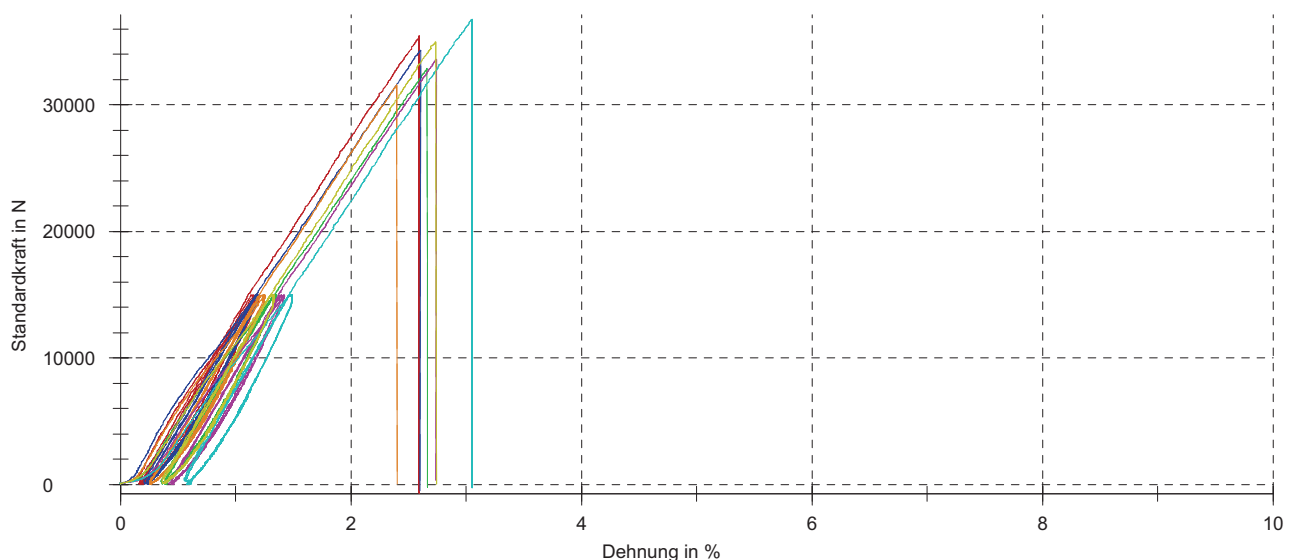
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 135°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Dyneema SK75	TUC	35400	10,9	89,07	422,1	Bruch an linker Abbaurolle
■	2	Dyneema SK75	TUC	32900	11,4	83,49	427,7	Bruch an rechter Abbaurolle
■	3	Dyneema SK75	TUC	34300	11,0	82,34	421,7	Bruch an linker Abbaurolle
■	4	Dyneema SK75	TUC	31600	10,5	83,06	438,3	Bruch an linker Abbaurolle
■	5	Dyneema SK75	TUC	33600	11,4	82,91	414,9	Bruch an rechter Abbaurolle
■	6	Dyneema SK75 (2)	TUC	36800	12,8	80,41	417,6	Bruch an linker Abbaurolle
■	7	Dyneema SK75 (2)	TUC	35000	11,3	78,36	414,6	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Dyneema n = 7	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34200	11,3	82,81	422,4
s	1730	0,7	3,30	8,4
v	5,05	6,22	3,99	1,98

Protokoll Zugversuch Seil

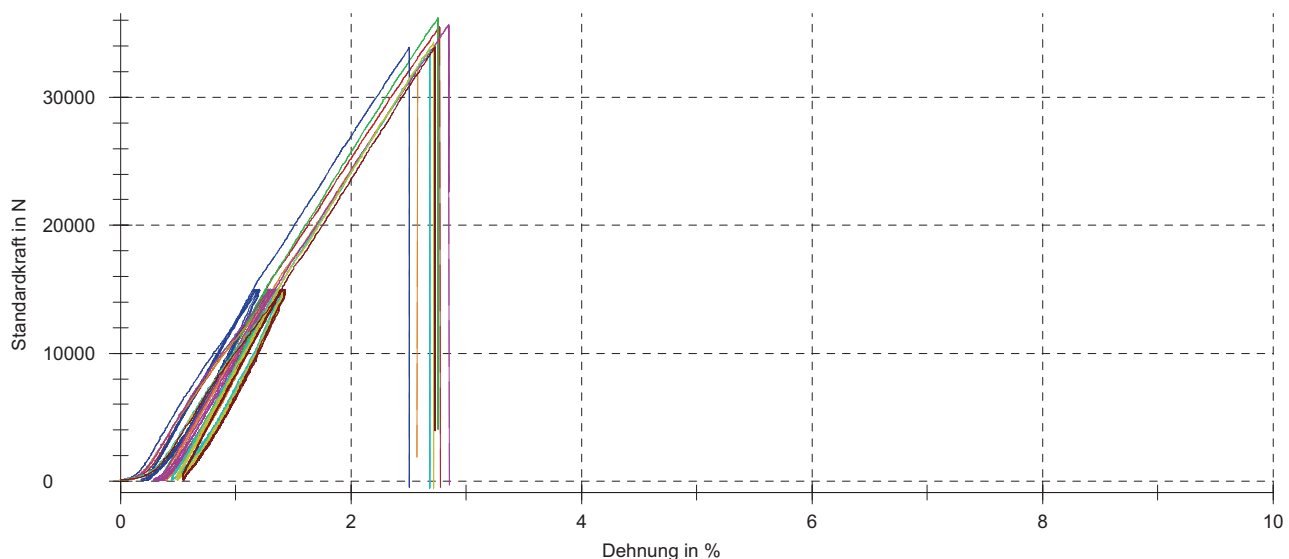
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 140°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	Dyneema SK75	TUC	35500	11,6	82,95	417,4	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	Dyneema SK75	TUC	36200	11,7	83,01	423,5	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	Dyneema SK75	TUC	33900	10,7	83,57	428,3	Bruch an linker Abbaurolle
	4	Dyneema SK75	TUC	32200	14,7	89,40	570,1	Bruch an linker Abbaurolle
	5	Dyneema SK75	TUC	35700	12,1	86,11	423,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	Dyneema SK75 (2)	TUC	33800	11,6	61,35	432,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	8	Dyneema SK75 (2)	TUC	34300	11,4	60,18	419,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	9	Dyneema SK75 (2)	TUC	33900	11,0	60,02	403,4	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Dyneema n = 8	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34400	11,8	75,82	439,7
s	1300	1,2	12,85	53,4
v	3,77	10,31	16,95	12,14

Protokoll Zugversuch Seil

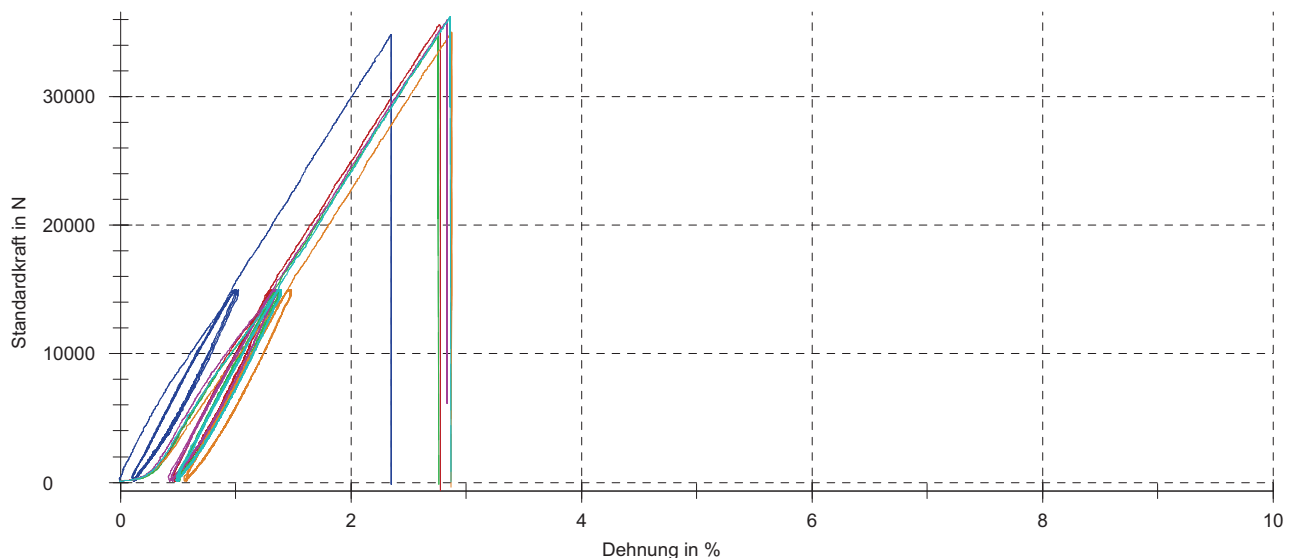
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probestyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 145°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	Dyneema SK75	TUC	35600	10,8	71,16	389,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	Dyneema SK75	TUC	34700	10,9	70,63	394,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	Dyneema SK75	TUC	34900	9,2	65,29	392,5	Bruch an rechter Abbaurolle - 2x Störung!
	4	Dyneema SK75	TUC	35000	11,9	69,60	412,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	Dyneema SK75	TUC	36000	11,4	72,57	401,8	Bruch an linker Abbaurolle
	6	Dyneema SK75	TUC	36300	11,3	72,14	394,1	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Dyneema n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	35400	10,9	70,23	397,6
s	637	0,9	2,64	8,4
v	1,80	8,34	3,76	2,12

Protokoll Zugversuch Seil

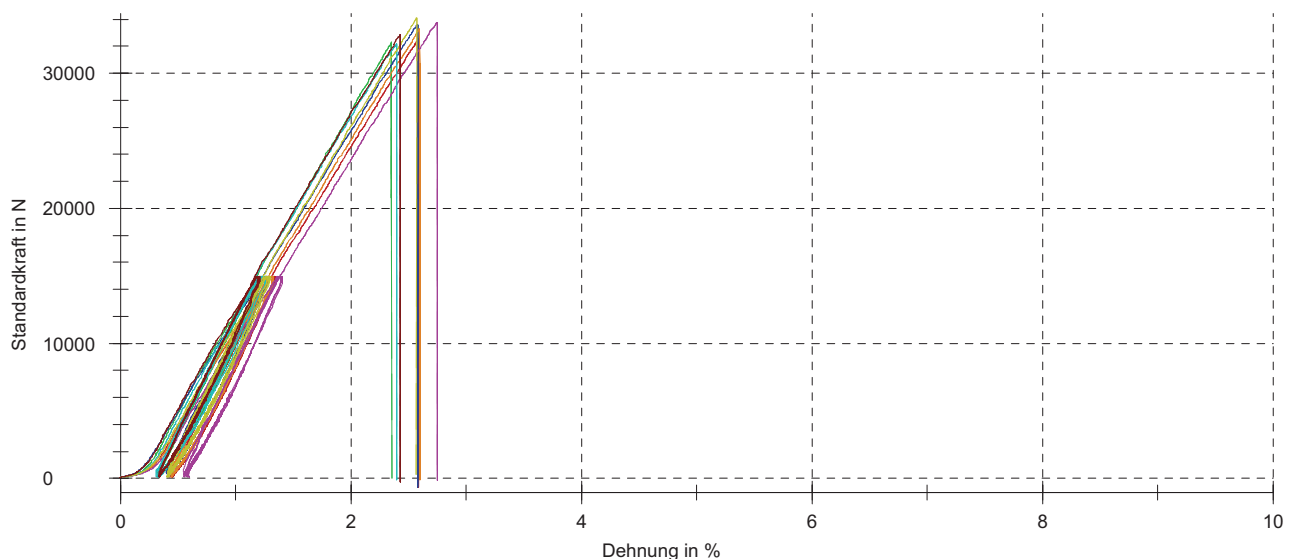
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Dyneema SK75 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 150°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	Dyneema SK75	TUC	32600	10,7	51,54	413,9	Bruch an linker Abbaurolle
	2	Dyneema SK75	TUC	32300	10,2	52,98	435,0	Bruch an linker Abbaurolle
	3	Dyneema SK75	TUC	33600	10,6	53,97	411,1	Bruch an linker Abbaurolle
	4	Dyneema SK75	TUC	33300	10,8	55,76	417,8	Bruch an linker Abbaurolle
	5	Dyneema SK75	TUC	33800	12,0	56,69	435,6	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	Dyneema SK75	TUC	32200	10,2	55,94	425,3	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	Dyneema SK75	TUC	34100	11,1	58,50	430,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	8	Dyneema SK75	TUC	32800	10,4	60,30	428,2	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Dyneema n = 8	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	33100	10,8	55,71	424,7
s	721	0,6	2,87	9,4
v	2,18	5,37	5,16	2,22

Anlage IV: Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Spectra[®] S1000 nach dem
Thermofixieren

Protokoll Zugversuch Seil

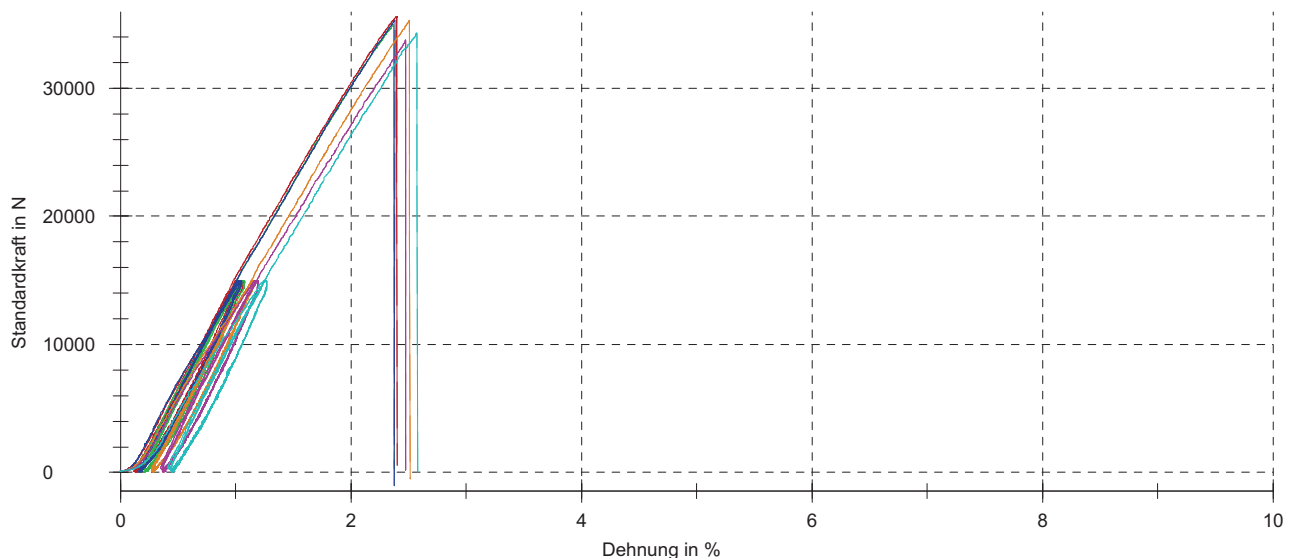
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 130°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Spectra S1000	TUC	35600	9,7	83,32	406,3	Bruch an rechter Abbaurolle
■	2	Spectra S1000	TUC	35000	10,0	83,71	420,6	Bruch an rechter Abbaurolle
■	3	Spectra S1000	TUC	35300	9,7	91,78	407,5	Bruch an rechter Abbaurolle
■	4	Spectra S1000	TUC	35300	10,7	88,67	425,3	Bruch an rechter Abbaurolle
■	5	Spectra S1000 (2)	TUC	33800	10,8	73,00	436,3	Bruch an linker Abbaurolle
■	6	Spectra S1000 (2)	TUC	34300	11,0	76,92	427,5	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34900	10,3	82,90	420,6
s	712	0,6	7,02	11,8
v	2,04	5,57	8,47	2,80

Protokoll Zugversuch Seil

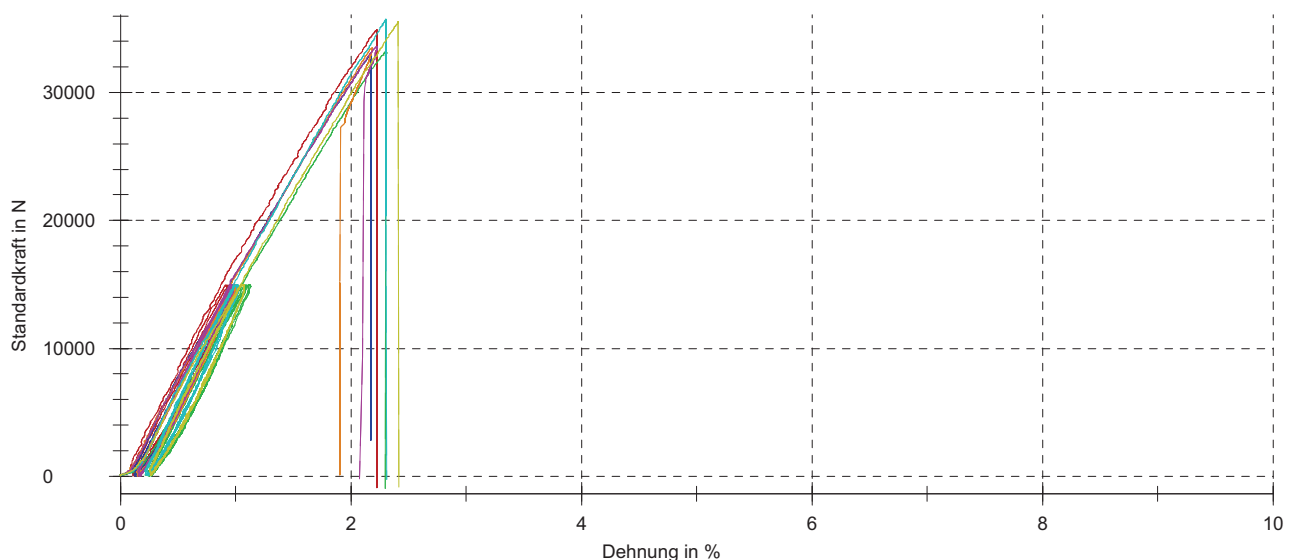
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 135°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Spectra S1000	TUC	34900	9,3	81,52	415,7	Bruch an rechter Markierung
■	2	Spectra S1000	TUC	33200	9,2	80,79	401,9	Bruch an linker Abbaurolle
■	3	Spectra S1000	TUC	33000	9,1	79,43	418,4	Bruch an linker Abbaurolle
■	4	Spectra S1000	TUC	33500	8,9	84,01	409,0	Bruch an linker Abbaurolle
■	5	Spectra S1000	TUC	33600	9,1	82,37	409,8	Bruch an linker Abbaurolle
■	6	Spectra S1000 (2)	TUC	35700	9,9	81,88	427,2	Bruch an linker Abbaurolle
■	7	Spectra S1000 (2)	TUC	35600	10,1	76,92	417,9	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra n = 7	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34200	9,4	80,99	414,3
s	1160	0,4	2,28	8,2
v	3,39	4,57	2,81	1,97

Protokoll Zugversuch Seil

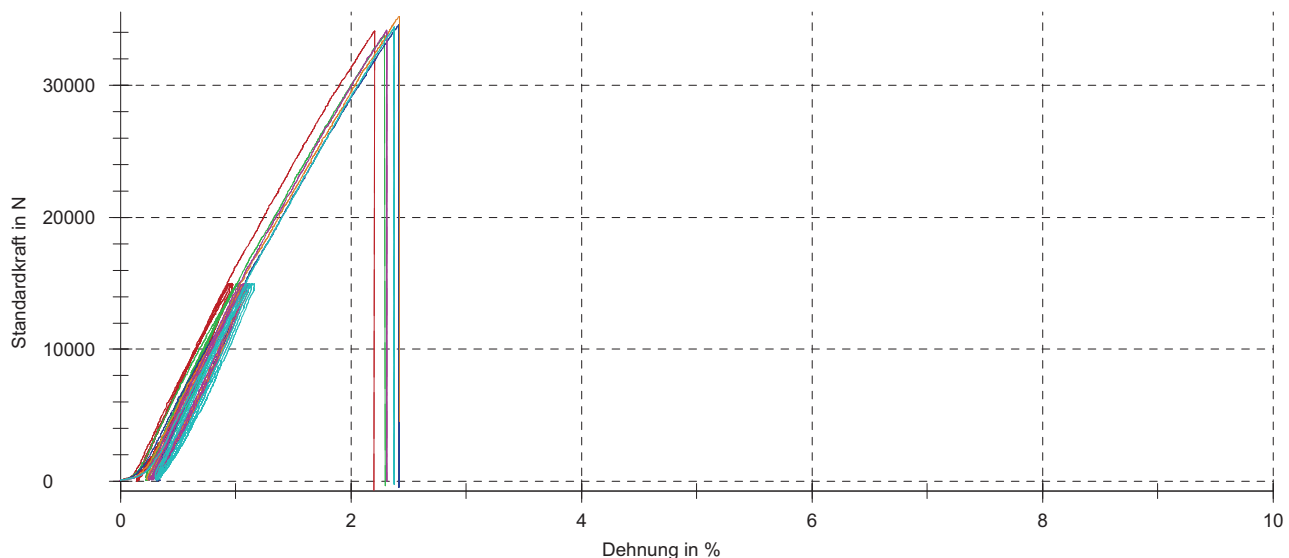
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 140°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Spectra S1000	TUC	34100	9,2	79,21	417,5	Bruch an linker Abbaurolle
■	2	Spectra S1000	TUC	33900	9,7	81,68	420,6	Bruch an rechter Abbaurolle
■	4	Spectra S1000	TUC	34600	10,1	83,30	417,6	Bruch an rechter Abbaurolle
■	6	Spectra S1000 (2)	TUC	35200	10,0	62,62	414,3	Bruch an linker Abbaurolle
■	7	Spectra S1000 (2)	TUC	34200	9,6	63,14	417,3	Bruch an linker Abbaurolle
■	8	Spectra S1000 (2)	TUC	34400	12,5	64,81	524,7	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34400	10,2	72,46	435,3
s	476	1,2	9,90	43,8
v	1,38	11,40	13,67	10,06

Protokoll Zugversuch Seil

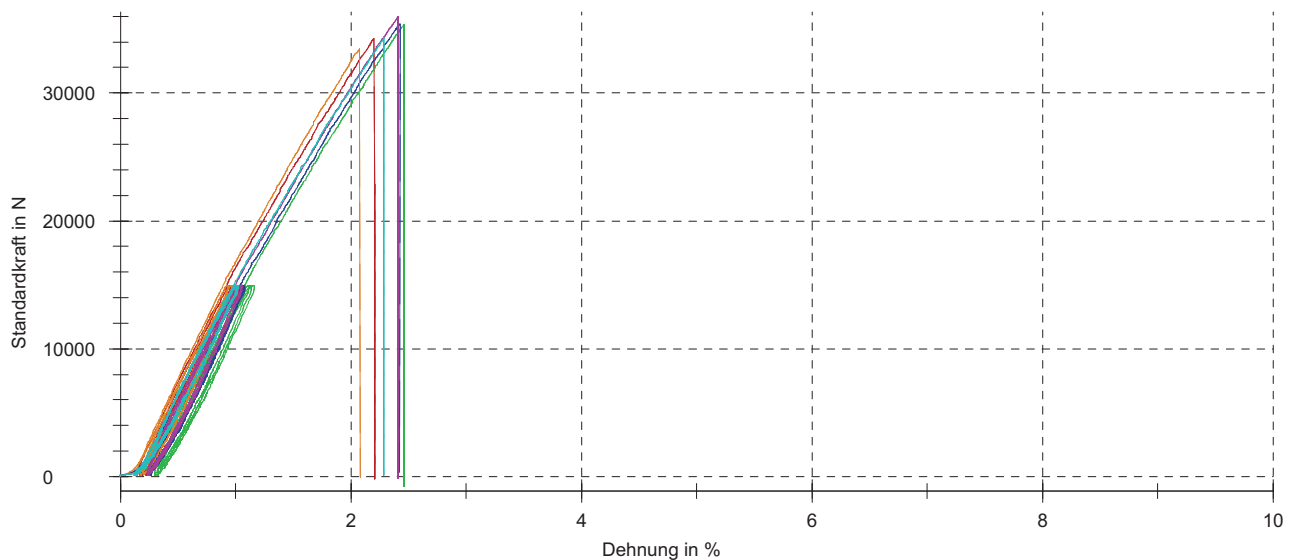
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 145°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
■	1	Spectra S1000	TUC	34300	9,4	69,55	427,8	Bruch an rechter Abbaurolle
■	2	Spectra S1000	TUC	35400	10,1	65,99	411,3	Bruch an rechter Abbaurolle
■	3	Spectra S1000	TUC	35400	10,1	68,50	417,4	Bruch an linker Abbaurolle
■	4	Spectra S1000	TUC	33500	8,6	68,88	412,0	Bruch an rechter Abbaurolle
■	5	Spectra S1000	TUC	36000	10,1	67,72	418,9	Bruch an rechter Abbaurolle
■	6	Spectra S1000	TUC	34400	9,4	69,94	412,4	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	34800	9,6	68,43	416,6
s	929	0,6	1,43	6,3
v	2,67	6,51	2,09	1,52

Protokoll Zugversuch Seil

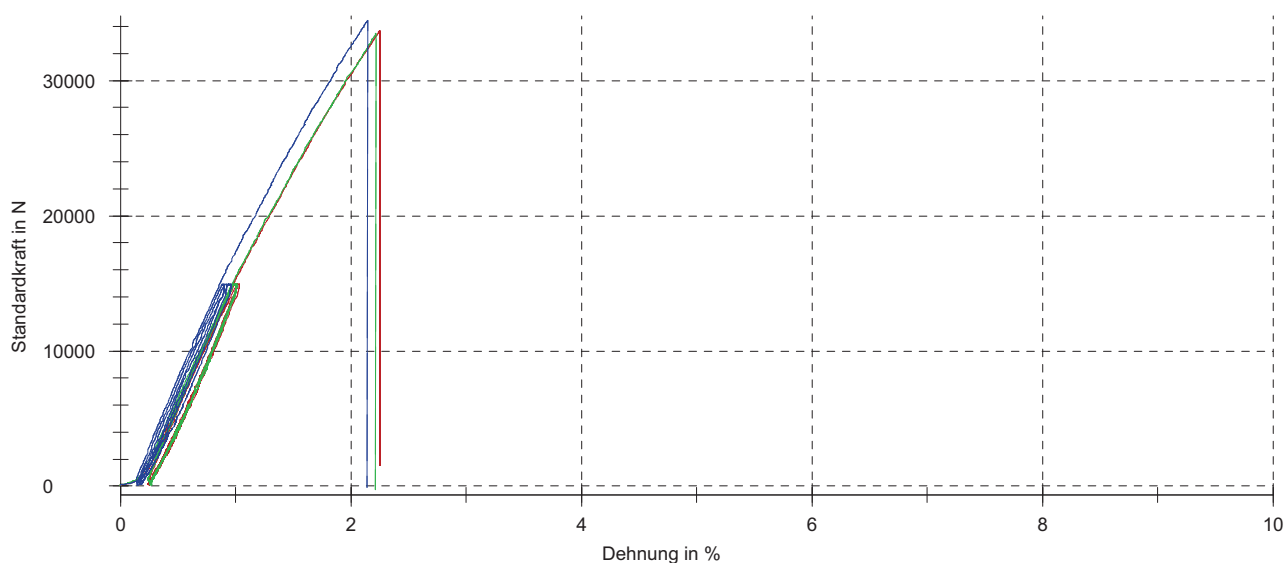
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : Spectra S1000 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 150°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	Spectra S1000	TUC	33700	9,6	53,63	426,1	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	Spectra S1000	TUC	33500	9,4	57,43	421,4	Bruch an linker Abbaurolle
	3	Spectra S1000	TUC	34500	9,0	56,91	417,1	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

Spectra n = 3	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	33900	9,3	55,99	421,6
s	504	0,3	2,06	4,5
v	1,49	3,49	3,68	1,07

Anlage V: Protokolle der Zugversuche an Seilen aus TNX® nach dem Thermofixieren

Protokoll Zugversuch Seil

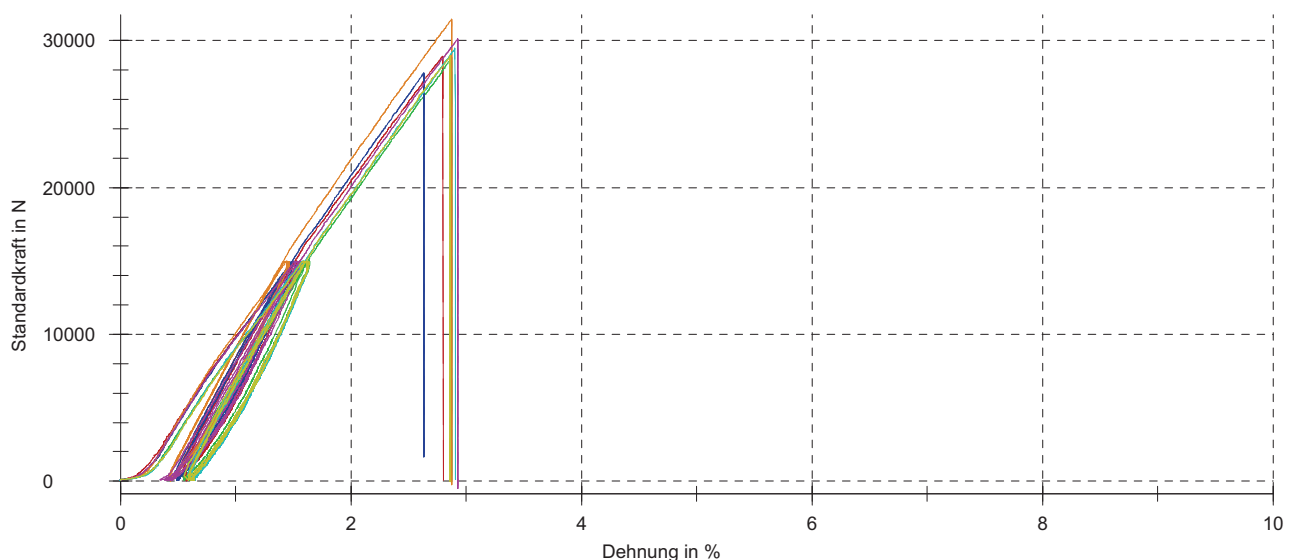
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 125°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	28900	11,7	97,43	417,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	TNX	TUC	28900	12,2	93,04	424,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	TNX	TUC	27800	11,3	82,47	429,7	Bruch an linker Abbaurolle - 1 Litze OK
	4	TNX	TUC	31500	12,3	84,94	426,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	TNX	TUC	30100	12,5	92,57	428,1	Bruch an rechter Markierung
	6	TNX (2)	TUC	29500	12,2	82,59	419,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	TNX (2)	TUC	29000	12,1	80,99	424,3	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 7	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	29400	12,0	87,72	424,4
s	1160	0,4	6,49	4,3
v	3,96	3,41	7,40	1,02

Protokoll Zugversuch Seil

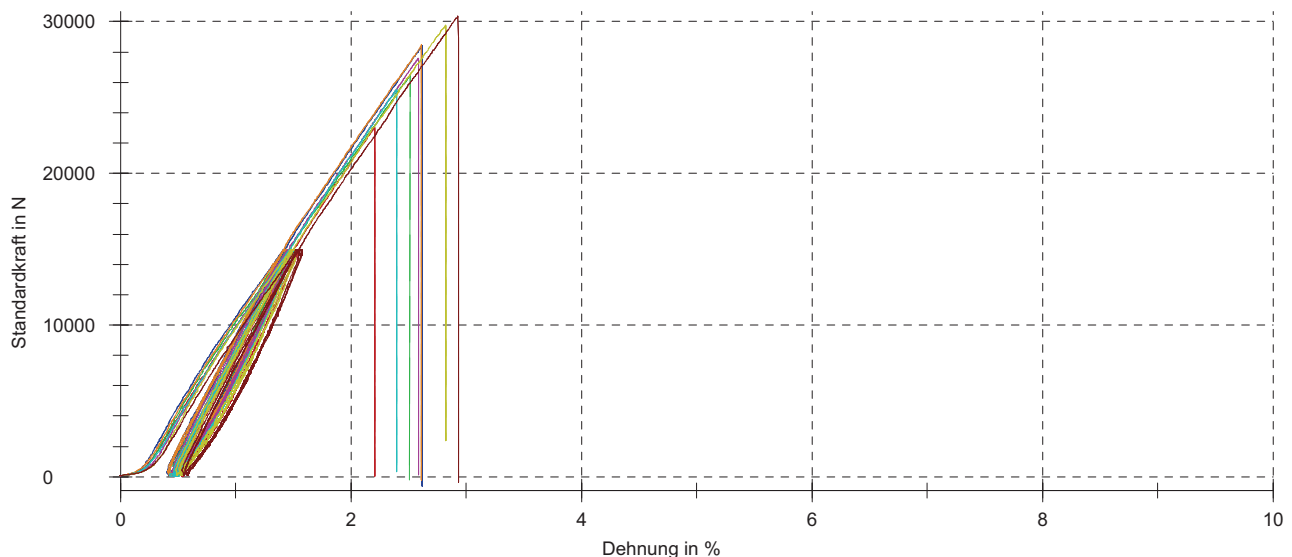
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 135°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	23100	9,1	79,90	412,1	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	TNX	TUC	26400	10,4	79,54	413,7	Bruch an linker Markierung
	3	TNX	TUC	28400	10,9	84,00	417,6	Bruch an linker Abbaurolle
	4	TNX	TUC	28500	11,1	81,97	425,3	Bruch an linker Abbaurolle
	5	TNX	TUC	27600	10,8	81,08	419,6	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	TNX	TUC	25500	10,2	75,37	423,5	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	TNX (2)	TUC	29800	11,9	83,24	421,8	Bruch an linker Abbaurolle
	8	TNX (2)	TUC	30400	16,4	87,20	560,3	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 8	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	27500	11,4	81,54	436,7
s	2380	2,2	3,51	50,1
v	8,67	19,38	4,30	11,48

Protokoll Zugversuch Seil

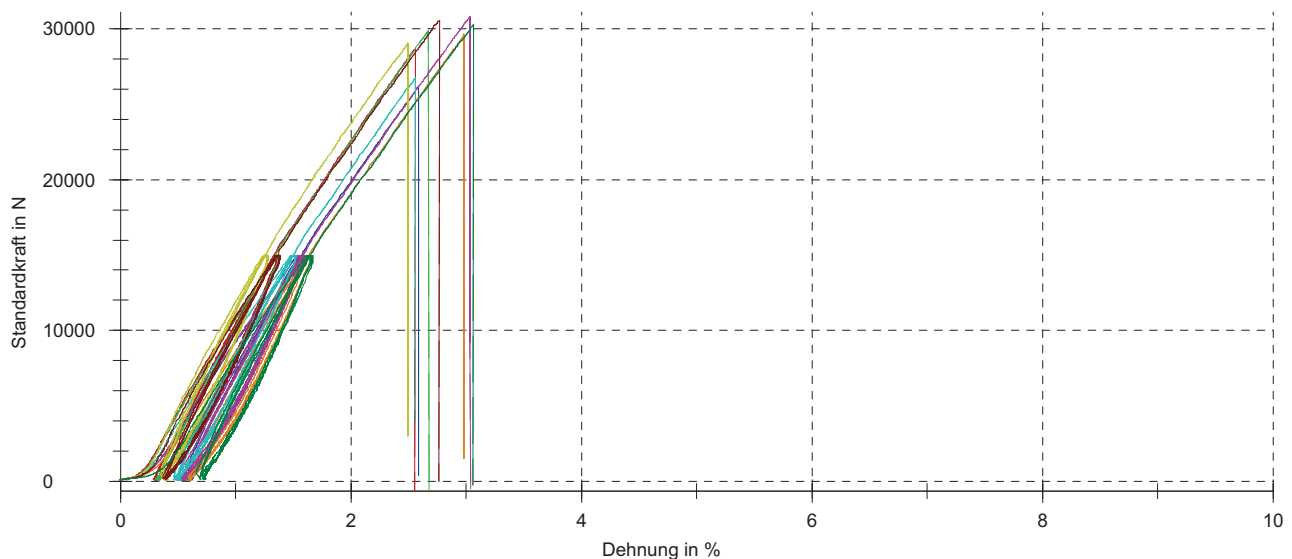
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 140°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	28700	10,6	90,52	414,6	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	TNX	TUC	29900	11,5	86,46	430,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	TNX	TUC	26200	11,0	83,99	425,3	Bruch an linker Markierung
	4	TNX	TUC	29700	12,8	85,43	428,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	TNX	TUC	30800	13,0	87,70	429,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	TNX	TUC	26700	10,6	80,83	415,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	TNX (2)	TUC	29100	10,2	68,66	409,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	8	TNX (2)	TUC	30600	11,5	70,09	415,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	9	TNX (2)	TUC	30300	12,4	73,22	405,6	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 9	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	29100	11,5	80,77	419,5
s	1650	1,0	8,10	9,3
v	5,66	8,79	10,03	2,21

Protokoll Zugversuch Seil

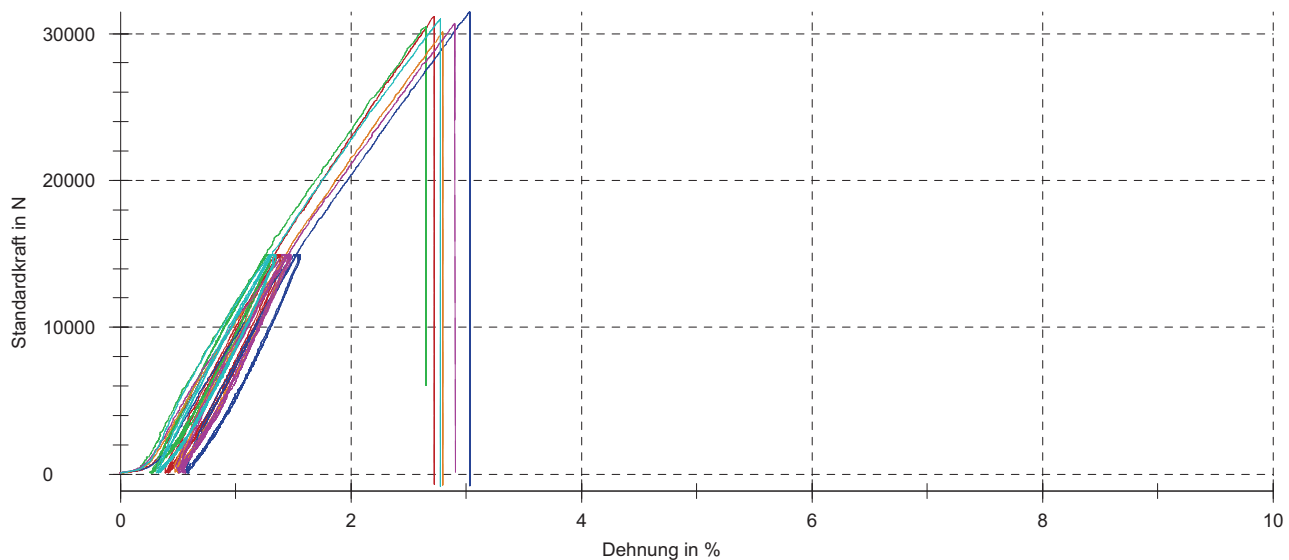
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 145°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	31200	9,5	72,38	350,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	TNX	TUC	30500	9,0	75,74	339,9	Bruch an linker Abbaurolle
	3	TNX	TUC	31500	12,5	81,93	412,7	Bruch an linker Markierung
	4	TNX	TUC	30100	11,9	81,39	424,6	Bruch an linker Abbaurolle
	5	TNX	TUC	30700	12,6	79,81	435,1	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	TNX	TUC	31000	11,9	78,62	426,8	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	30800	11,2	78,31	398,2
s	489	1,6	3,65	41,9
v	1,59	13,88	4,66	10,52

Protokoll Zugversuch Seil

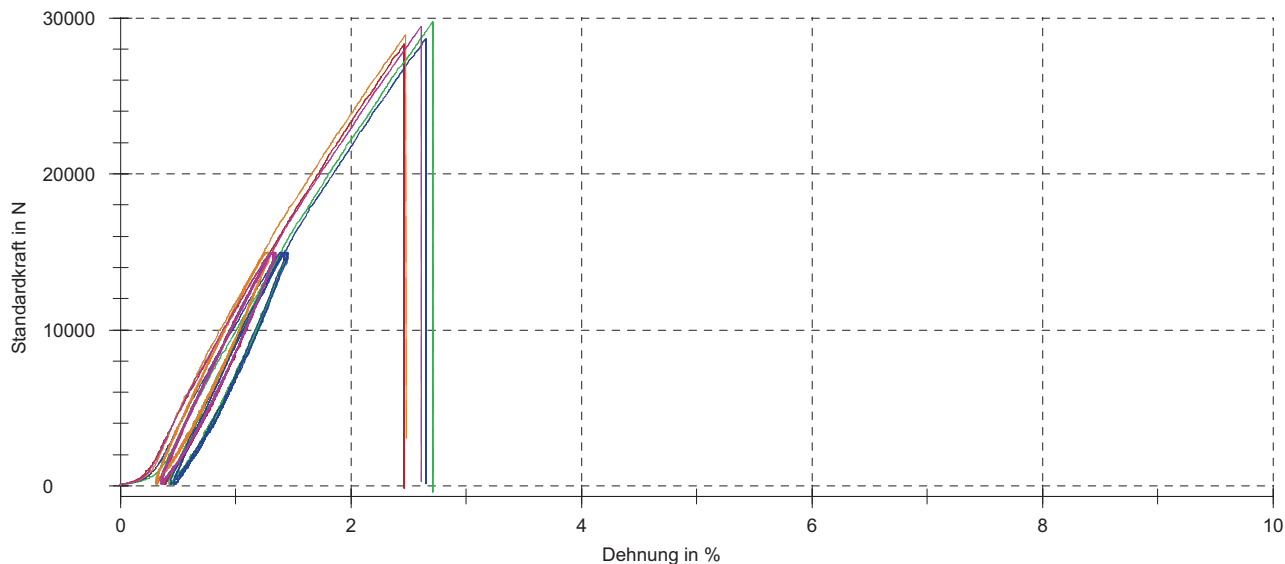
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : TNX UHMW-PE
Probenotyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 150°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	TNX	TUC	28300	10,2	65,35	412,6	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	TNX	TUC	29700	11,4	66,74	421,8	Bruch an linker Abbaurolle
	3	TNX	TUC	28600	11,1	65,93	419,4	Bruch an rechter Abbaurolle
	4	TNX	TUC	28900	10,2	64,85	410,3	Bruch an linker Abbaurolle
	5	TNX	TUC	29500	13,8	68,45	528,3	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

TNX n = 5	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	29000	11,3	66,26	438,5
s	582	1,5	1,41	50,4
v	2,01	13,11	2,13	11,51

Anlage VI: Protokolle der Zugversuche an Seilen aus Eoston[®] FT093 nach dem
Thermofixieren

Protokoll Zugversuch Seil

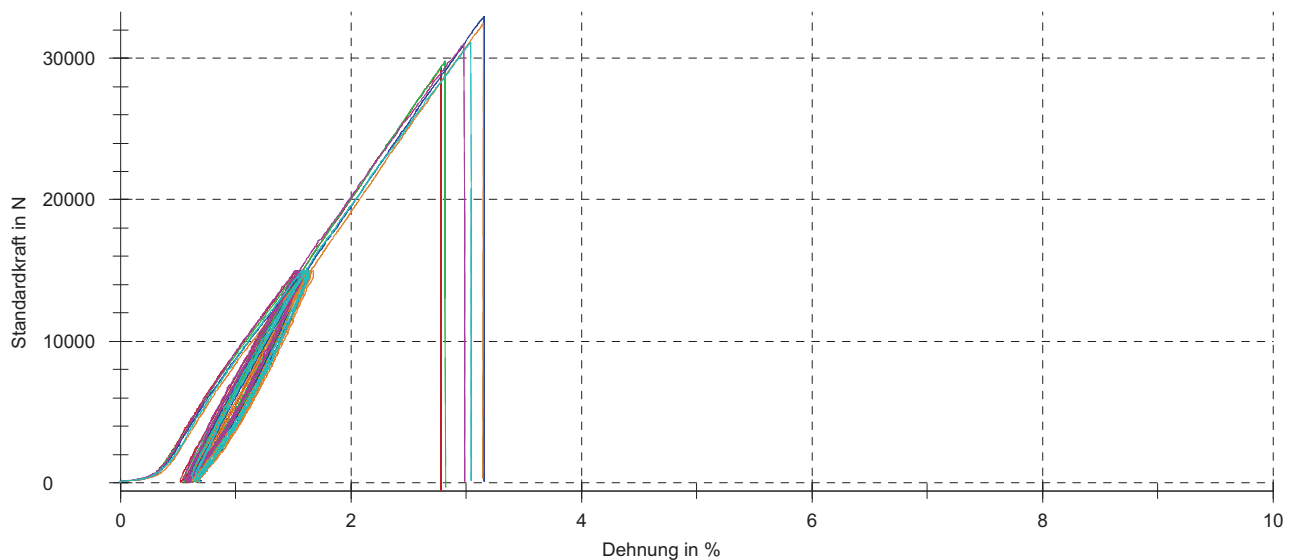
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : EOSTEN FT093 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 130°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	EOSTEN	TUC	29400	12,0	91,81	431,4	Bruch an linker Abbaurolle
	2	EOSTEN	TUC	29800	12,2	82,15	433,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	EOSTEN	TUC	33000	13,4	91,10	424,2	Bruch an linker Abbaurolle
	4	EOSTEN	TUC	32400	13,8	92,32	437,1	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	EOSTEN (2)	TUC	31000	12,5	84,02	418,3	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	EOSTEN (2)	TUC	31100	12,7	81,91	418,6	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

EOSTEN n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	31100	12,8	87,22	427,1
s	1410	0,7	5,03	7,9
v	4,53	5,37	5,76	1,86

Protokoll Zugversuch Seil

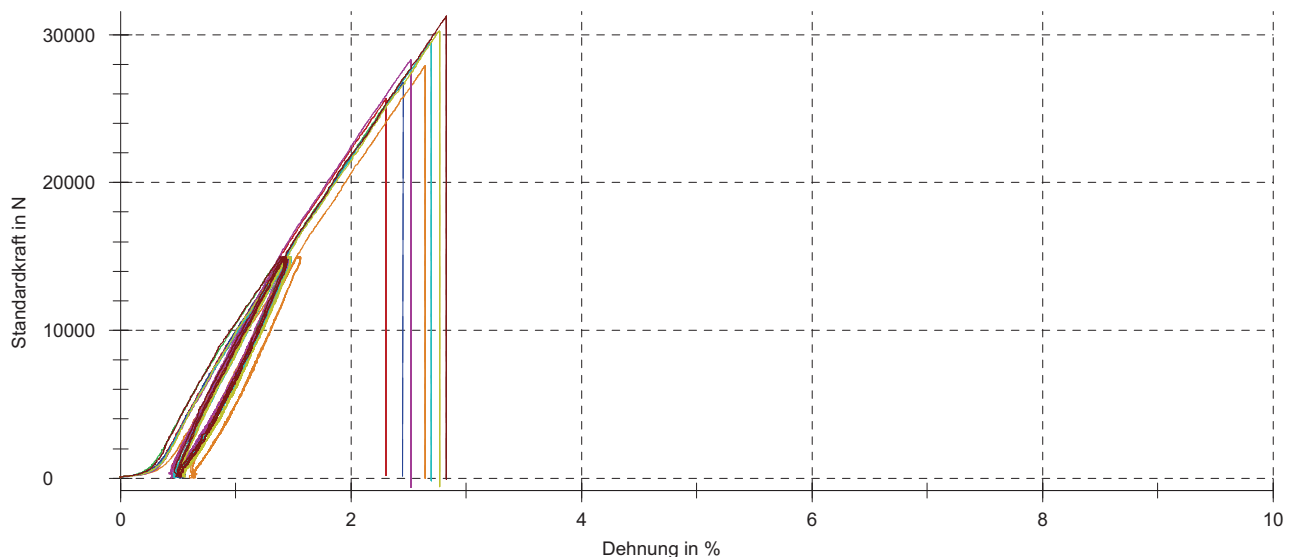
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : EOSTEN FT093 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 135°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	EOSTEN	TUC	25700	9,4	78,39	406,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	2	EOSTEN	TUC	27700	10,4	81,29	410,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	EOSTEN	TUC	26800	7,8	80,07	315,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	4	EOSTEN	TUC	27900	11,1	78,47	418,9	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	EOSTEN	TUC	28300	10,3	78,69	409,2	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	EOSTEN	TUC	29500	11,1	80,74	412,2	Bruch an linker Markierung
	7	EOSTEN (2)	TUC	30200	11,2	83,69	404,3	Bruch an rechter Abbaurolle
	8	EOSTEN (2)	TUC	31300	11,6	84,06	410,0	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

EOSTEN n = 8	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	28400	10,4	80,68	398,4
s	1840	1,3	2,25	33,7
v	6,45	12,19	2,78	8,46

Protokoll Zugversuch Seil

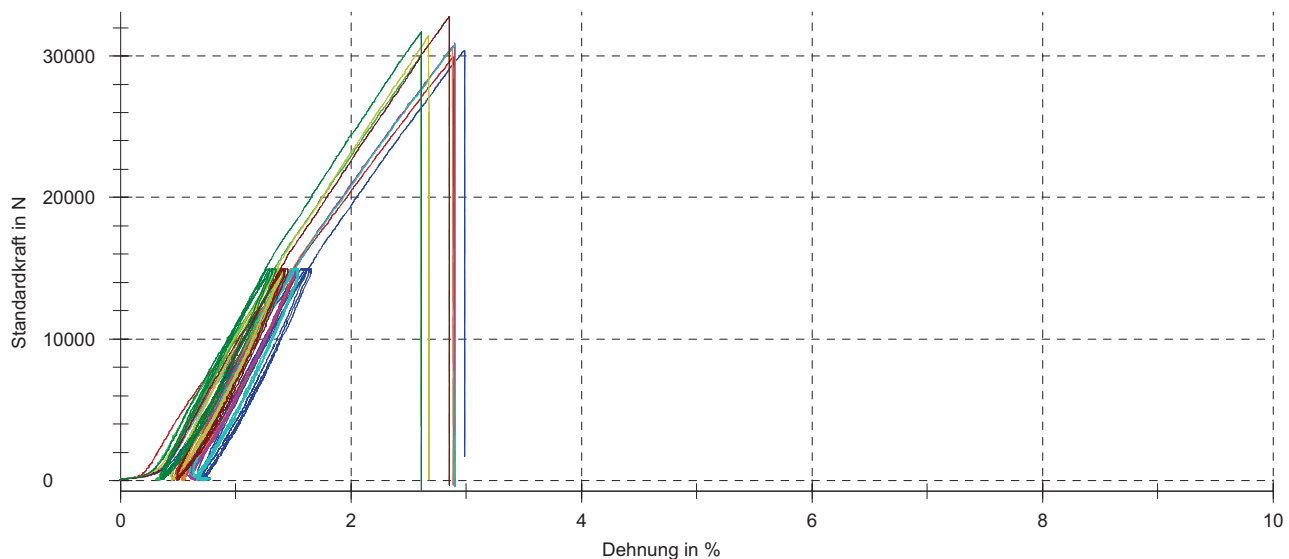
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : EOSTEN FT093 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 140°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	EOSTEN	TUC	30000	11,9	81,94	412,0	Bruch an linker Abbaurolle
	2	EOSTEN	TUC	30100	10,7	80,88	408,1	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	EOSTEN	TUC	30400	12,1	81,74	406,5	Bruch an linker Abbaurolle
	4	EOSTEN	TUC	30600	14,9	84,29	515,8	Bruch an linker Abbaurolle
	5	EOSTEN	TUC	30900	12,1	83,85	415,0	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	EOSTEN	TUC	30800	12,1	81,02	415,8	Bruch an linker Abbaurolle
	7	EOSTEN (2)	TUC	31400	11,2	73,01	417,3	Bruch an linker Abbaurolle
	8	EOSTEN (2)	TUC	32800	11,4	67,95	398,3	Bruch an linker Abbaurolle
	9	EOSTEN (2)	TUC	31700	10,8	69,75	411,9	Bruch an rechter Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

EOSTEN n = 9	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	31000	11,9	78,27	422,3
s	894	1,3	6,27	35,6
v	2,89	10,58	8,00	8,42

Protokoll Zugversuch Seil

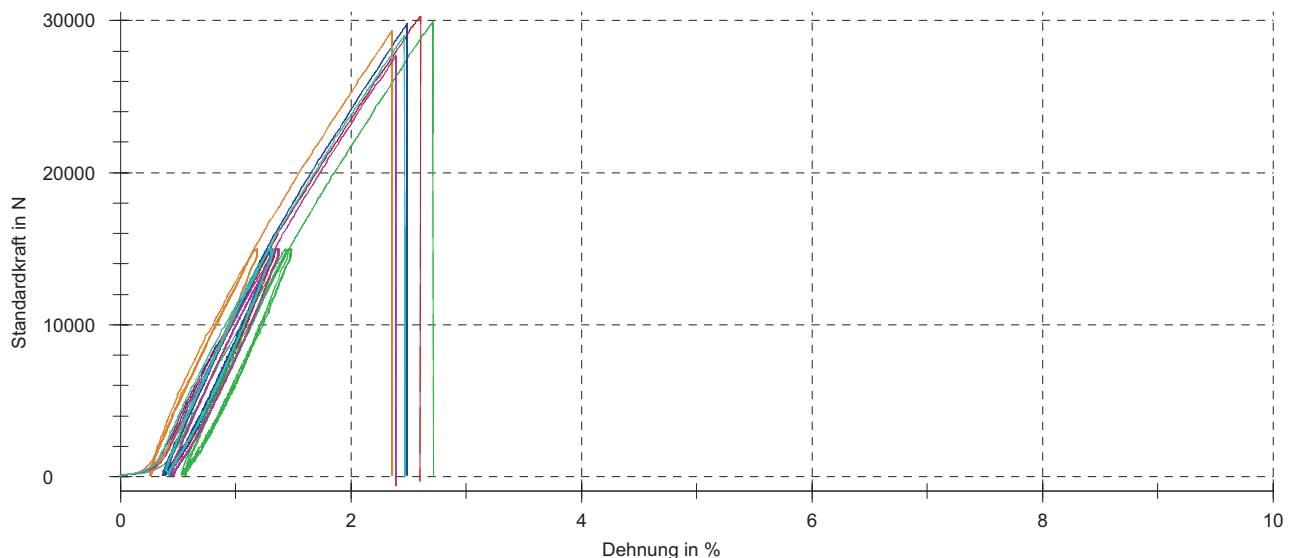
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : EOSTEN FT093 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 145°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	EOSTEN	TUC	30300	11,0	76,45	423,6	Bruch an linker Abbaurolle
	3	EOSTEN	TUC	29900	11,7	78,43	430,4	Bruch an rechter Abbaurolle
	4	EOSTEN	TUC	29800	10,7	77,42	431,7	Bruch an linker Abbaurolle
	5	EOSTEN	TUC	29300	10,3	77,87	436,7	Bruch an rechter Abbaurolle
	6	EOSTEN	TUC	27700	10,3	75,73	432,5	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	EOSTEN	TUC	29000	10,4	77,41	423,0	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

EOSTEN n = 6	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	29400	10,8	77,22	429,7
s	922	0,5	0,98	5,4
v	3,14	4,98	1,27	1,25

Protokoll Zugversuch Seil

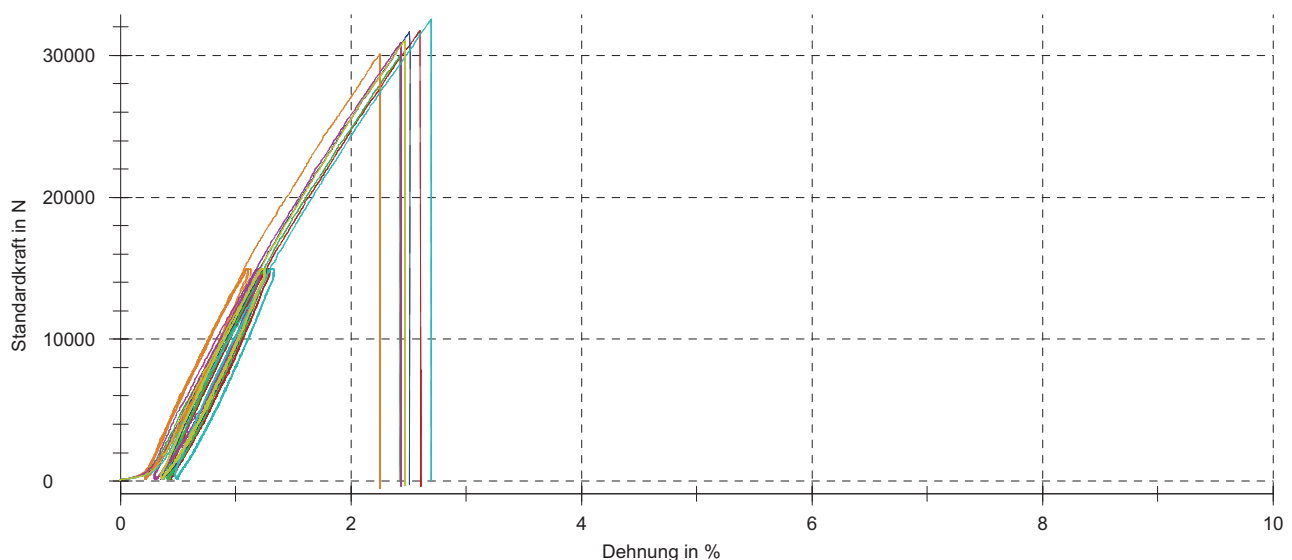
Überschrift : Protokoll
Zugversuch Seil
Prüfnorm : DIN EN ISO 2307
Art und Bezeichnung : Zugprüfung
Werkstoff : EOSTEN FT093 UHMW-PE
Probentyp : 6mm-Seil, nach Standard (39mm Flechtlänge)
Vorbehandlung : Thermofixiert 150°C @ 12%MBL
Prüfer : JM
Bemerkung : 4x Umschlingung Kraftabbaurollen (D120); 100 bar Klemmdruck

Vorkraft : 100 N
Geschwindigkeit bis Prüfungsende : 250 mm/min

Prüfergebnisse:

Legende	Nr	Type [Mat-D-Art-Besch]	Hersteller	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm	Kommentar
	1	EOSTEN	TUC	31800	10,9	66,88	419,3	Bruch an linker Abbaurolle
	2	EOSTEN	TUC	30000	10,4	65,01	426,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	3	EOSTEN	TUC	31700	10,7	68,07	424,6	Bruch an linker Abbaurolle
	4	EOSTEN	TUC	30100	9,5	66,85	420,8	Bruch an rechter Abbaurolle
	5	EOSTEN	TUC	30900	12,9	69,24	530,0	Bruch an linker Abbaurolle
	6	EOSTEN	TUC	32600	11,4	70,38	422,5	Bruch an rechter Abbaurolle
	7	EOSTEN	TUC	31100	10,5	69,29	425,5	Bruch an linker Abbaurolle

Seriengrafik:



Statistik:

EOSTEN n = 7	F _{max} N	dL(F _{max}) mm	t _{Prüfung} s	L ₀ mm
\bar{x}	31200	10,9	67,96	438,5
s	924	1,1	1,84	40,4
v	2,97	9,80	2,71	9,22

Anlage VII: Kalibrierkurven zur Gel-Permeations-Chromatographie

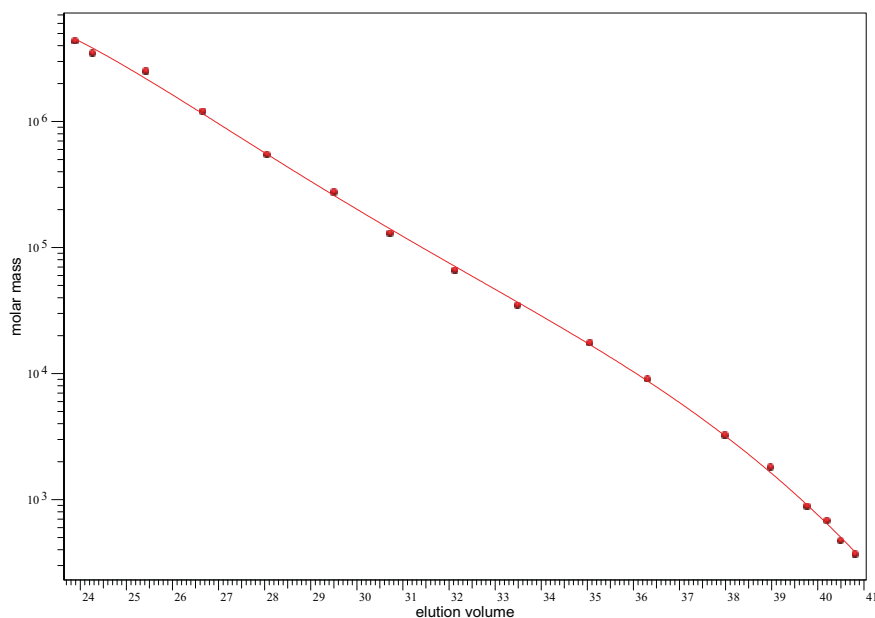
PSS WinGPC UniChrom - Analysenreport

Kalibration



Datei: W:\GPC_DATEN...al_14\PG15\ps-uni-06-01-14.CAL

Kommentar: ps readycal



weitere Kalibrierparameter:

Kalibration erstellt durch: pm

auf Säulen: 4* polefin linxl 10 µm 300*8 mm

Fit Qualität:

Fit-Typ: PSS Poly 5

R : 0.99979

Mark-Houwink Koeffizienten:

a = 0.661 K = 0.02252

Interner Standard:

Name: BHT

bei: 41.94

Kalibriertabelle:

Elutions- volumen [ml]	Molmasse [Da]	Probenname	Steigung	Abweichung [%]
23.88	4410000	PS 4410000 g/mol	-0.19	3.08
24.26	3510000	PS 3510000 g/mol	-0.20	9.54
25.42	2520000	readycal ht-ps green	-0.22	-12.77
26.65	1210000	readycal ht-ps red	-0.23	-4.34
28.05	549000	readycal ht-ps white	-0.23	0.44
29.50	277000	readycal ht-ps green	-0.22	-6.19
30.72	130000	readycal ht-ps red	-0.21	8.45
32.12	66000	readycal ht-ps white	-0.21	8.06
33.48	34800	readycal ht-ps green	-0.21	6.25
35.05	17600	readycal ht-ps red	-0.22	-3.30
36.30	9120	readycal ht-ps white	-0.24	-3.86
37.98	3250	readycal ht-ps green	-0.28	-0.98
38.97	1820	readycal ht-ps red	-0.31	-9.35
39.76	890	PS 370, 890	-0.34	2.70
40.19	682	PS 266, 682	-0.35	-5.14
40.49	474	readycal ht-ps white	-0.37	7.14
40.81	370	PS 370, 890	-0.38	3.84

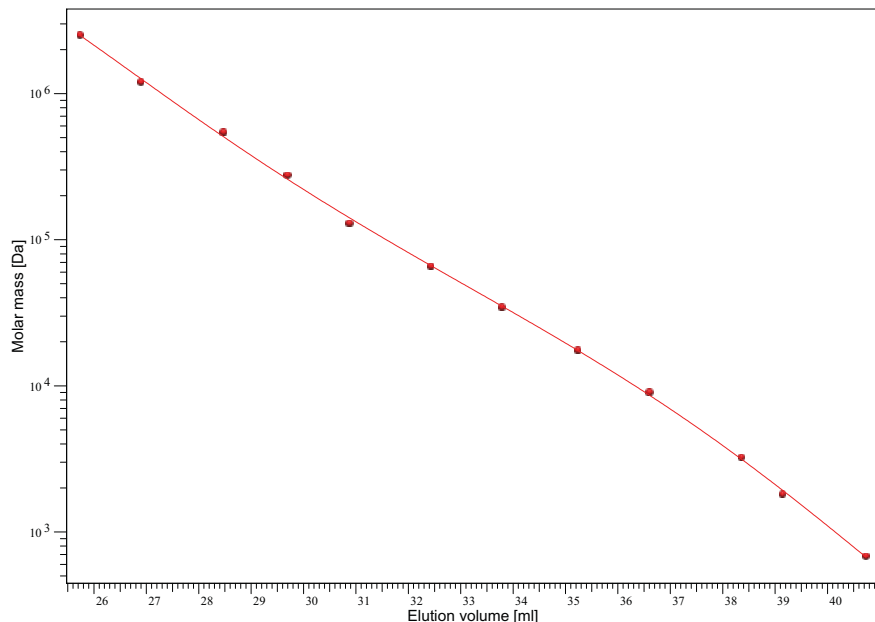
PSS WinGPC UniChrom - Analysenreport

Kalibration



Datei: W:\GPC_DATEN...14\cal_14\PG15\ps-22-04-14.CAL

Kommentar: ps ht-readycal



weitere Kalibrierparameter:

Kalibration erstellt durch: pm

auf Säulen: 4*poefin, lin xl, 10 µm, 300*8 mm

Fit Qualität:

Fit-Typ: PSS Poly 5

R : 0,99983

Mark-Houwink Koeffizienten:

a = 0,655 K = 0,01900

Interner Standard:

Name: BHT

bei: 48,06

Kalibriertabelle:

Elutions-volumen [ml]	Molmasse [Da]	Probenname	Steigung	Abweichung [%]
25,74	2520000	readycal ht-ps green	-0,25	-0,61
26,89	1210000	readycal ht-ps red	-0,26	5,07
28,45	549000	readycal ht-ps white	-0,25	-6,44
29,69	277000	readycal ht-ps green	-0,23	-5,82
30,86	130000	readycal ht-ps red	-0,22	9,57
32,43	66000	readycal ht-ps white	-0,21	1,10
33,79	34800	readycal ht-ps green	-0,21	1,09
35,23	17600	readycal ht-ps red	-0,22	-0,36
36,59	9120	readycal ht-ps white	-0,23	-4,59
38,35	3250	readycal ht-ps green	-0,26	-2,79
39,13	1820	readycal ht-ps red	-0,28	6,58
40,73	682	readycal ht-ps white	-0,29	-1,46

Lebenslauf

Jens Mammitzsch

geboren am 17.05.1980 in Karl – Marx – Stadt (jetzt Chemnitz)

Familienstand: verheiratet

Schulische Ausbildung

1986 – 1992	Johann – Wolfgang – von – Goethe – Oberschule
1992 – 1998	Johann – Wolfgang – von – Goethe – Gymnasium; Abschluss: Abitur

Berufliche Ausbildung

01.09.1998 – 31.07.1999	Ableisten des Grundwehrdienstes (3./PzGrenBtl 12); 37520 Osterode/Harz; anschließend Wehrübung
01.09.1999 – 31.03.2002	Ausbildung zum Schneidwerkzeugmechaniker bei Johannes Giesser Messerfabrik GmbH; 71364 Winnenden Abschluss: Facharbeiter mit Gesellenbrief

Akademische Ausbildung

01.10.2002 – 29.10.2008	Studium des Maschinenbaus an der Technischen Universität Chemnitz; Abschluss: Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)
-------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Berufliche Tätigkeiten

01.03.2002 – 31.08.2002	Anstellung als Schneidwerkzeugmechaniker bei Johannes Giesser Messerfabrik GmbH; 71364 Winnenden
Seit 01.11.2008	Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter der Professur Fördertechnik an der Technischen Universität Chemnitz